

SCIENCE

PHYSIQUE

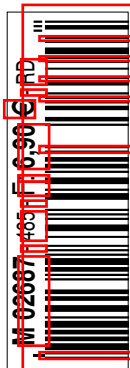
**AU LHC, LA BEAUTÉ
DES PARTICULES
SÈME LE TROUBLE**

MÉDECINE

**GUÉRIR DU
DIABÈTE PAR
LA CHIRURGIE ?**

PORTFOLIO

**SPECTACULAIRES
ET ÉPHÉMÈRES
DELTAS DE LAVE**



MARS 2018
N° 485

BITCOIN ET BLOCKCHAIN

**Comment les cryptomonnaies
changent le monde**



les conférences

mars
— mai 2018

accès gratuit

cité
sciences
et industrie

Palais
DÉCOUVERTE

Le vivant est en interaction avec le milieu qu'il habite. Plantes et animaux, dont les humains, abritent et élèvent une multitude d'organismes indispensables à leur survie, qui eux-mêmes dépendent de leurs hôtes pour le gîte et le couvert. Cependant les humains citadins perdent l'expérience de la nature, et nous assistons à un effondrement inédit des espèces animales. La compréhension des interdépendances entre vivants et milieux nous aidera-t-elle à mieux partager avec les autres terriens ?

Avec Augustin Berque, Valérie Chansigaud, Anne-Caroline Prévot, François Sarrazin, Marc-André Sélosse

les vivants façonnent leur milieu... et vice versa !

cycle de conférences

les mardis

— à 19h

20 mars

— 10 avril

cité
sciences
et industrie

Palais
DÉCOUVERTE

Pasteur : les microbes en héritage

cycle de conférences

les mercredis

— à 19h

14 mars

— 2 mai

Louis Pasteur est à l'origine des plus grandes révolutions scientifiques du XIX^e siècle. Aujourd'hui les chercheurs continuent ses travaux en microbiologie pour faire face à l'apparition de nouvelles maladies et mettre au point les futurs vaccins. Nous puisons ainsi dans l'Histoire les ressources nécessaires pour répondre aux défis d'aujourd'hui et de demain.

Avec Patrick Berche, Pierre Feillet, Anne-Marie Moulin, Annick Perrot, François Rodhain, Maxime Schwartz

POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef: Maurice Mashaal

Rédactrice en chef adjointe: Marie-Neige Cordonnier

Rédacteurs: François Savatier, Sean Bailly

HORS-SÉRIE POUR LA SCIENCE

Rédacteur en chef adjoint: Loïc Mangin

Développement numérique: Philippe Ribeau-Gésippe

Conception graphique: William Londiche

Directrice artistique: Céline Lapert

Maquette: Pauline Bilbault, Raphaël Queruel, Ingrid Leroy

Revisseuse: Anne-Rozenn Jouble

Marketing & diffusion: Arthur Peys

Direction du personnel: Olivia Le Prévost

Direction financière: Cécile André

Fabrication: Marianne Sigogne et Olivier Lacam

Directeur de la publication et gérant: Frédéric Mériot

Anciens directeurs de la rédaction: Françoise Pétry et Philippe Boulanger

Conseiller scientifique: Hervé This

Ont également participé à ce numéro:

Thomas Badr, Serge Berthier, Maud Bruguère, Fanny Brun, Thierry Champel, Adrien Coffinet, François-Xavier Coudert, Mathias Fink, Julien Gaillard, Hélène Gélot, Adrien Gilbert, Capucine Jahan, Renaud Le Gac, Maude Le Gall, Claire Levallois-Barth, Virginie Monvoisin, Joseph Moran, Christophe Pichon, Marie-France Sagot

PRESSE ET COMMUNICATION

Susan Mackie

susan.mackie@pourlascience.fr • Tél. 01 55 42 85 05

PUBLICITÉ France

stephanie.jullien@pourlascience.fr

ABONNEMENTS

Abonnement en ligne: <http://boutique.pourlascience.fr>

Courriel: pourlascience@abopress.fr

Tél.: 03 67 07 98 17

Adresse postale: Service des abonnements -

Pour la Science, 19 rue de l'Industrie, BP 90053,

67402 Illkirch Cedex

Tarifs d'abonnement 1 an (12 numéros)

France métropolitaine: 59 euros - Europe: 71 euros

Reste du monde: 85,25 euros

DIFFUSION

Contact kiosques: À Juste Titres ; Benjamin Boutonnet

Tél. 04 88 15 12 41

Information/modification de service/réassort:

www.direct-editeurs.fr

SCIENTIFIC AMERICAN

Editor in chief: Mariette DiChristina

President: Dean Sanderson

Executive Vice President: Michael Florek

Toutes demandes d'autorisation de reproduire, pour le public français ou francophone, les textes, les photos, les dessins ou les documents contenus dans la revue « Pour la Science », dans la revue « Scientific American », dans les livres édités par « Pour la Science » doivent être adressées par écrit à « Pour la Science S.A.R.L. », 162 rue du Faubourg Saint-Denis, 75010 Paris. © Pour la Science S.A.R.L. Tous droits de reproduction, de traduction, d'adaptation et de représentation réservés pour tous les pays. La marque et le nom commercial « Scientific American » sont la propriété de Scientific American, Inc. Licence accordée à « Pour la Science S.A.R.L. ». En application de la loi du 11 mars 1957, il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement la présente revue sans autorisation de l'éditeur ou du Centre français de l'exploitation du droit de copie (20 rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).

Origine du papier: Autriche

Taux de fibres recyclées: 30 %

«Eutrophisation» ou «Impact

sur l'eau»: P 0,007 kg/tonne



Certifié PEFC

Ce produit est issu de forêts gérées durablement et de sources contrôlées.

10-31-1282

pefc-france.org



MAURICE MASHAAL
Rédacteur en chef

EUCLIDE, LE TRANSISTOR ET LE BITCOIN

Vers 300 avant notre ère, un certain Euclide d'Alexandrie a compilé une bonne partie du savoir mathématique de son époque en un ouvrage ayant traversé les âges, *Les Éléments*. Dans cette somme, célèbre à la fois par son contenu et par son style de présentation en axiomes suivis de théorèmes et de leurs démonstrations, on trouve notamment la preuve qu'il existe une infinité de nombres premiers — ces entiers qui ne sont divisibles que par 1 et par eux-mêmes. C'étaient les premiers rudiments de la théorie des nombres: un domaine des mathématiques devenu, depuis le XIX^e siècle, l'une des disciplines scientifiques les plus abstraites.

En 1947, dans le cadre de recherches fondamentales sur les matériaux semi-conducteurs, les physiciens américains William Shockley, John Bardeen et Walter Brattain inventaient le transistor. Ce composant électronique, qui leur a valu le prix Nobel de physique en 1956, est au fondement de l'essor de l'électronique et des ordinateurs, essor auquel nous devons la révolution numérique actuelle.

Pourquoi évoquer la théorie des nombres et les transistors alors que *Pour la Science* consacre la une de ce numéro aux cryptomonnaies et aux blockchains (voir pages 27 à 47)? Pour rappeler que ces dernières inventions leur sont fortement redevables: aux transistors pour l'infrastructure informatique et électronique, à la théorie des nombres pour les protocoles cryptographiques indispensables au fonctionnement et à la sécurité de ces systèmes.

La morale n'est pas très originale: des recherches scientifiques fondamentales, de pure curiosité, conduisent parfois à des développements technologiques qui ont le pouvoir de transformer profondément la société. Les historiens et les scientifiques le savent bien; ce savoir est hélas moins bien partagé chez les politiques.

SOMMAIRE

N° 485 /
Mars 2018

ACTUALITÉS

P. 6

ECHOS DES LABOS

- *Homo sapiens* est arrivé au Levant bien avant les Néandertaliens
- Des primates clonés pour la première fois
- L'effet Hall quantique... en dimension 4!
- Le génome géant de l'axolotl séquencé
- Des plumes supernoires
- La plus ancienne tombe scythe
- Des séquences d'ADN pas si inutiles
- Théia, un poids plume
- L'œil du cyclone a ses critères

P. 18

LES LIVRES DU MOIS

P. 20

AGENDA

P. 22

HOMO SAPIENS INFORMATICS

Pourquoi le monde est imprédictible

Gilles Dowek

P. 24

CABINET DE CURIOSITES SOCIOLOGIQUES

Capter à tout prix du temps de cerveau

Gérald Bronner

GRANDS FORMATS



P. 48

MEDECINE

UN SCALPEL CONTRE LE DIABÈTE

Francesco Rubino

La chirurgie bariatrique, qui court-circuite certaines parties du tube digestif, se révèle plus efficace contre le diabète de type 2 que les traitements classiques.



P. 56

PORTFOLIO

ÉPHÉMÈRES DELTAS DE LAVE

Michel Detay et Pierre Thomas

Le 31 décembre 2016, à Hawaï, un delta formé en quelques années par des coulées de lave s'est effondré dans l'océan. Comment naît et meurt une telle plateforme, créée par le brusque refroidissement de la lave à son arrivée au contact de l'eau de mer? La réponse en images.



P. 64

PHYSIQUE DES PARTICULES

BEAUTÉ HORS-NORME AU LHC

Guy Wilkinson

Malgré ses succès, le modèle standard de la physique des particules est incomplet. Au Cern, l'expérience LHCb, qui étudie les désintégrations des «particules de beauté», a-t-elle fourni les premiers indices d'une théorie plus fondamentale?

Au centre du numéro

CAHIER SPÉCIAL

L'HYDROGÈNE, ACCÉLÉRATEUR DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

En partenariat avec



En couverture :
© Mmaxer/shutterstock.com

Les portraits des contributeurs sont de Seb Jarnot



POUR LA
SCIENCE.FR

LETTRE D'INFORMATION

NE MANQUEZ PAS
LA PARUTION DE
VOTRE MAGAZINE
GRÂCE À LA NEWSLETTER

- Notre sélection d'articles
- Des offres préférentielles
- Nos autres magazines en kiosque



Inscrivez-vous
www.pourlascience.fr



P.74

HISTOIRE DES SCIENCES

LE TÉLESCOPE OUBLIÉ DE CHARLES FÉRY

Guillaume Durey, André Pierre Legrand et Denis Beaudouin

Un télescope récemment retrouvé dans les greniers de l'ESPCI, une école d'ingénieurs à Paris, s'est révélé un acteur clé, au début du xx^e siècle, d'une aventure qui occupait les savants depuis plusieurs siècles: la mesure de la température du Soleil.



P.27

ECONOMIE

BITCOIN ET BLOCKCHAIN

Comment les cryptomonnaies changent le monde



P. 28

LE NOUVEAU MONDE DES CRYPTOMONNAIES ET DES BLOCKCHAINS

John Pavlus

Les cryptomonnaies, telles que le bitcoin, et les blockchains qui les rendent possibles modifient le paysage financier et économique. Comment, et jusqu'où?

P.36

FAIRE SAUTER LA BANQUE AVEC DES CRYPTOMONNAIES

Alexander Lipton et Alex «Sandy» Pentland

Les monnaies numériques fondées sur la technologie des blockchains préfigurent peut-être de nouveaux réseaux financiers qui mettront un terme à la concentration des richesses et qui stimuleront l'économie.

P.44

LA BLOCKCHAIN, INSTRUMENT DE CONFIANCE?

Natalie Smolenski

La blockchain est un outil informatique qui instaure une confiance au sein du réseau qui l'utilise. Quel en sera l'impact social ultime? Tout dépendra de la façon dont nos identités numériques et nos données personnelles seront gérées.

RENDEZ-VOUS

P.80

LOGIQUE & CALCUL

L'ALGORITHME DES COQUILLAGES

Jean-Paul Delahaye

Pour les mollusques, s'enrouler en spirale afin de construire un abri permanent se fait de multiples façons. Toutes sont des variantes d'un procédé général qu'on s'efforce de reproduire.

P.86

ART & SCIENCE

Le monde dans un savon

Loïc Mangin

P.88

IDÉES DE PHYSIQUE

Courons sous la pluie!

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



P.92

CHRONIQUES DE L'ÉVOLUTION

Le bizarre sonar du cachalot

Hervé Le Guyader

P.96

SCIENCE & GASTRONOMIE

Combinatoire sur pâtes

Hervé This

P.98

A PICORER

A

CTUALITÉS

P.6 Echos des labos
P.18 Livres du mois
P.20 Agenda
P.22 *Homo sapiens informaticus*
P.24 Cabinet de curiosités sociologiques

PRÉHISTOIRE

HOMO SAPIENS EST ARRIVÉ AU LEVANT BIEN AVANT LES NÉANDERTALIENS



Le demi-maxillaire gauche trouvé, nommé Misliya-1. Toutes les dents sont présentes, à l'exception d'une incisive.

La découverte en Israël d'un demi-maxillaire d'*Homo sapiens* datant d'environ 200 000 ans prouve que l'homme moderne est sorti d'Afrique bien plus tôt qu'on ne le pensait.

La partie supérieure du carré 9 de l'unité stratigraphique 6 de la grotte de Misliya, sur le mont Carmel, en Israël, vient de montrer qu'*Homo sapiens* a quitté l'Afrique bien plus tôt qu'on ne le croyait : il y a probablement bien plus de 200 000 ans ! Cette découverte change radicalement le consensus entre préhistoriens. Encore récemment, *H. sapiens* était censé avoir quitté l'Afrique pour le Levant une première fois il y a quelque 100 000 ans, y être retourné sous la pression des Néandertaliens, puis être revenu en Eurasie il y a 80 000-60 000 ans

pour bousculer son cousin néandertalien et conquérir le reste du globe.

La preuve de la présence d'*H. sapiens* au Levant il y a quelque 200 000 ans est Misliya-1, nom donné à un très ancien demi-maxillaire *sapiens* mis au jour et étudié par une équipe internationale dirigée par Mima Weinstein-Evron, de l'université de Haïfa (cliché ci-dessus). Pour le dater, trois laboratoires ont appliqué à divers artefacts et aux matières composant une dent plusieurs techniques de datation : résonance de spin électronique, thermoluminescence et radiochronologie. Compte tenu de la dizaine de dates

obtenues, Misliya-1 aurait un âge compris entre 177 000 et 194 000 ans.

Afin de prouver qu'il s'agit bien d'un maxillaire d'*H. sapiens*, les chercheurs se sont livrés à une étude morphométrique, c'est-à-dire qu'ils ont mesuré tous les détails visibles de la forme du maxillaire et des dents afin de les comparer à ceux des formes archaïques d'*H. sapiens* et d'autres espèces humaines.

Un point essentiel est le fait que toutes les unités stratigraphiques de la grotte de Misliya, y compris l'unité 6, sont mêlées d'artefacts relevant de ce que les chercheurs nomment le Moustérien levantin précoce, une industrie lithique caractérisée par un débitage dit Levallois (notamment avec des éclats triangulaires pouvant servir de pointe). Or ce type de Moustérien est traditionnellement

associé en Eurasie aux Néandertaliens, dont il constitue un marqueur. Comme la strate où a été trouvé Misliya-1 est bien antérieure à l'arrivée des Néandertaliens au Proche-Orient, les chercheurs avancent que l'apparition du débitage Levallois en Eurasie pourrait être « associée à l'apparition des *H. sapiens* » au Levant. Il s'agit là d'une évolution notable du point de vue des paléanthropologues sur le Moustérien.

La sortie d'Afrique précoce de certains *Homo sapiens* archaïques suggérée par Misliya-1 a aussi l'avantage de régler plusieurs difficultés posées par l'hypothèse d'une expansion d'*H. sapiens* en Eurasie ayant démarré il y a seulement 80 000 ans : la présence d'*H. sapiens* dans le sud de la Chine il y a plus de 100 000 ans et le fait que les Néandertaliens de l'Altai sibérien étaient déjà métissés avec des *H. sapiens* il y a 100 000 ans.

Cela rejoint une idée déjà proposée. Il existe au Levant une culture matérielle qui semble intermédiaire entre l'Acheuléen (l'industrie lithique caractéristique du Paléolithique inférieur) et l'industrie moustérienne : la culture acheuléo-yabroudienne, qui a prospéré il y a entre 350 000 et 200 000 ans. Or un crâne partiel fossile découvert dans les années 1920 sur le site de Mugharet el-Zuttiyeh, en Galilée, en relève. Ce crâne, celui de l'« Homme de Galilée », est d'abord passé pour celui d'un Néandertalien. Toutefois, dans les années 1980, après avoir réétudié tous les fossiles du Levant, le paléoanthropologue français Bernard Vandermeersch avait souligné son impression, partagée par nombre de collègues, que le crâne en question, quoique archaïque, était de type *sapiens*.

Avec d'autres observations, notamment le fait qu'on ne connaissait au Levant aucun fossile néandertalien d'âge comparable à celui de l'homme de Galilée, Bernard Vandermeersch en avait déduit qu'une très ancienne population d'*H. sapiens* archaïques s'était établie au Proche-Orient bien avant 130 000 ans – époque à partir de laquelle un réchauffement du climat a attiré au Proche-Orient une population néandertalienne allochtone. Celle-ci s'est ensuite mélangée avec les habitants *sapiens* du Proche-Orient, donnant lieu aux premiers métissages d'*H. sapiens* et d'*H. neanderthalensis*. ■

FRANÇOIS SAVATIER

J. Hershkovitz et al.,
Nature, vol. 359, pp. 456-459, 2018

Des primates clonés pour la première fois

Le 8 février 2018, une équipe chinoise de l'Institut de neuroscience à Shanghai a annoncé avoir cloné des macaques crabiers (*Macaca fascicularis*). C'est la première fois que le clonage porte sur des primates, et la question éthique est de nouveau posée. Éclairage par le biologiste et philosophe Georges Chapouthier.



Propos recueillis par FRANÇOIS SAVATIER

GEORGES CHAPOUTHIER,
neurobiologiste et
directeur de recherche
émérite au CNRS

Comment les chercheurs chinois ont-ils procédé pour cloner des macaques ?

Qiang Sun et ses collègues ont procédé par « transfert de noyau de cellules somatiques », c'est-à-dire qu'ils ont remplacé les noyaux d'ovocytes de macaque crabier soit par des noyaux de cellules de macaques adultes, soit par des noyaux de cellules fœtales différenciées – des fibroblastes. Ils ont ensuite créé un environnement chimique favorable au développement des germes représentés par ces ovocytes modifiés. De précédents travaux leur ont inspiré une recette favorisant la reprogrammation de ces cellules. Sur un total de 417 essais, cette recette a conduit à la mise au monde, par une mère porteuse, de deux bébés macaques, issus d'ovocytes à noyaux de fibroblaste...

Depuis Dolly, la brebis clonée en 2007, quel est le bilan du clonage reproductif ?

Pour le moment, assez maigre. Avant ce clonage de macaques, 23 espèces de mammifères ont été clonées, avec le même manque d'efficacité : le mouton avec Dolly, la vache, le chien, la souris, etc. Avec le recul, on constate que les techniques de clonage restent très inefficaces, et les travaux chinois l'illustrent bien. Par ailleurs, les animaux nés semblent vieillir prématurément et en mauvaise santé. Dolly n'a vécu que sept ans au lieu de douze, typiquement, pour un mouton ; et les souris clonées sont obèses... Enfin, on parvient très difficilement à cloner des mâles.

Le clonage est-il malgré tout utile ?

Peu. On peut citer le cas de ce propriétaire de chat tout heureux d'avoir obtenu une copie de son animal ! Ou encore la tentative de clonage presque réussie – presque, car le bébé cloné est

mort d'infection au bout de 48 heures – d'un gaur, une espèce menacée de bovidé sauvage d'Asie du Sud-Est.

Pourquoi alors cloner des primates ?

Les auteurs disent ouvrir la voie vers l'utilisation, en recherche fondamentale ou appliquée, de primates modèles génétiquement uniformes. Selon eux, ces animaux seront utiles dans l'étude par édition génomique (dans la pratique, on modifierait les gènes des fibroblastes avant le transfert de leur noyau) de certaines maladies spécifiques aux primates qu'ils qualifient de « maladies à défauts génétiques définis ». Tout cela reste vague, comme l'intérêt pratique du clonage reproductif, non seulement parce qu'il est très peu efficace, mais aussi parce que l'uniformité génétique qu'il produit est discutable. Il ne faut pas oublier qu'il faut des ovocytes pour produire des clones ; or leur cytoplasme (tout ce que contient la membrane cellulaire, hors le noyau) a une influence sur l'individu produit, notamment via l'ADN des mitochondries. Et la mère porteuse exerce aussi une influence épigénétique sur l'embryon. En comparaison, les lignées expérimentales de souris ou autres obtenues par croisements entre frères et sœurs ont des gènes rigoureusement identiques et ont connu des influences épigénétiques très proches. Mais la recherche continue et les techniques de clonage finiront par s'améliorer...

Ce qui augmentera le risque que des humains soient un jour clonés ?

Oui, toutefois un tel clonage ne sera pas le fait de chercheurs institutionnels, mais de quelque savant dévoyé au service d'une secte, voire d'un entrepreneur cherchant à proposer une nouvelle façon de se reproduire. De toute façon, même efficace, le clonage reproductif produira une vie peu robuste et moins diverse, donc très problématique quant à la perpétuation de l'espèce, qu'il s'agisse d'humains ou d'animaux.

Z. Liu et al., *Cell*, vol. 172, pp. 1-7, 2018

PHYSIQUE

L'EFFET HALL QUANTIQUE... EN DIMENSION 4!

Deux équipes de physiciens ont créé des dispositifs permettant de simuler l'effet Hall quantique tel qu'il se manifesterait dans un espace à quatre dimensions.

Est-il possible de mettre en évidence un phénomène qui, en théorie, ne se manifesterait que dans un espace à quatre dimensions? Cela semble impossible, car nous vivons dans un monde tridimensionnel. Et pourtant, l'équipe d'Immanuel Bloch, de l'institut Max-Planck de physique quantique, près de Munich, et celle de Mikael Rechtsman, de l'université d'État de Pennsylvanie, viennent d'y parvenir: ils ont observé les caractéristiques de l'effet Hall quantique en dimension 4 dans deux dispositifs très différents.

Le physicien américain Edwin Herbert Hall a découvert l'effet qui porte son nom en 1879. Il a montré que lorsqu'un matériau est parcouru par un courant électrique en présence d'un champ magnétique, il se crée dans le matériau une tension perpendiculaire au champ magnétique. Cette tension transversale, la tension de Hall, dépend notamment de la résistance de Hall. Cette dernière, ou son inverse la conductance de Hall, est liée aux propriétés du matériau.

Un siècle plus tard, le physicien allemand Klaus von Klitzing a découvert que l'effet Hall a un pendant quantique. Lorsque l'épaisseur du matériau est très réduite, de sorte que les électrons se déplacent uniquement dans deux dimensions, que la température est proche du zéro absolu et que le champ magnétique est intense, la conductance de Hall prend des valeurs discrètes; elle s'exprime comme le multiple entier d'un coefficient qui ne dépend que de grandeurs fondamentales, la charge électrique de l'électron et la constante de Planck.

L'effet Hall quantique n'existe (en général) pas en dimension 3. En 2000, Shou-Cheng Zhang et Jianping Hu de l'université Stanford, aux États-Unis, et d'autres, ont montré qu'il était possible de généraliser l'effet Hall quantique dans un espace à quatre dimensions. Celui-ci aurait des propriétés spécifiques, par exemple un courant de Hall non linéaire. Mais l'espace physique étant limité à trois dimensions, ce résultat théorique n'était-il qu'une curiosité mathématique?

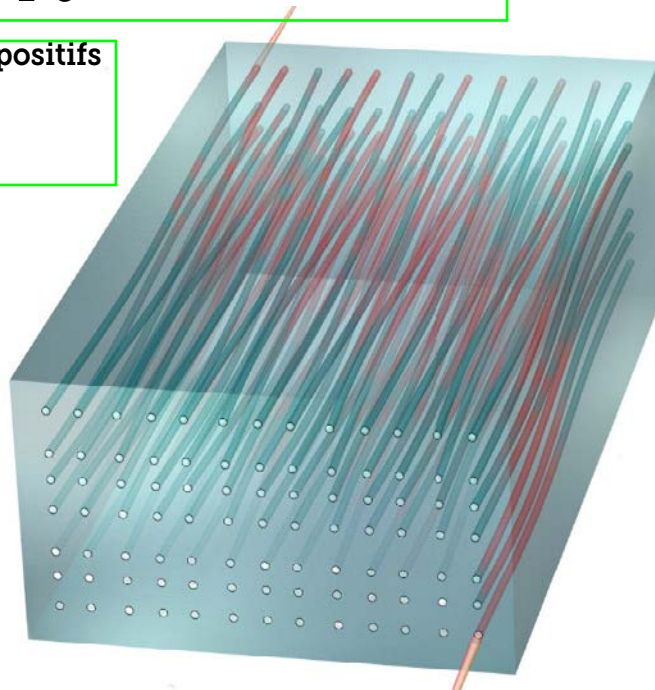


Illustration d'un réseau de guides d'ondes dans un bloc de verre sculpté au laser. Il permet de simuler un espace à quatre dimensions dans l'expérience de l'équipe de Mikael Rechtsman. Dans ce système, la lumière joue le rôle du courant électrique et se propage dans le réseau en accord avec les prédictions de l'effet Hall quantique dans un espace de dimension 4.

L'équipe d'Immanuel Bloch s'est inspirée de travaux du Britannique David Thouless, qui a montré que certains effets dynamiques périodiques appliqués à un système unidimensionnel étaient mathématiquement équivalents à l'effet Hall quantique en dimension 2. Le groupe a alors combiné deux de ces systèmes. L'ensemble, constitué de réseaux d'atomes ultrafroids piégés par des lasers, réalise l'analogue d'un système quadridimensionnel. Immanuel Bloch et ses collègues ont alors observé la non-linéarité du courant de Hall prédite par la théorie.

L'équipe de Mikael Rechtsman, elle, a fait appel à des guides d'ondes photoniques. En effet, il a été montré ces dernières années qu'un motif complexe de guides d'ondes permettait de créer des «dimensions artificielles». Les chercheurs ont conçu leur système pour imiter un espace quadridimensionnel et ont pu observer l'effet Hall attendu.

À quoi peut servir ce résultat? D'après Mikael Rechtsman, il existe dans l'espace tridimensionnel de nombreux systèmes physiques qui présentent des «dimensions cachées». Ce serait le cas, par exemple, de certains alliages métalliques ayant une structure de quasi-cristal. ■

SEAN BAILLY

M. Lohse *et al.*, *Nature*, vol. 553, pp. 55-58, 2018;
O. Zilberberg *et al.*, *ibid.*, pp. 59-62

L'EMPREINTE CARBONE... DES BOUILLOIRES !

Autour d'Alejandro Gallego-Schmid, de l'université de Manchester, une équipe de chercheurs a mesuré les performances des différentes bouilloires commercialisées en Europe. Il s'avère que l'empreinte écologique des bouilloires ne dépend que marginalement de leur fabrication : la principale contribution à l'émission de dioxyde de carbone des bouilloires est tout simplement liée au chauffage de trop grandes quantités d'eau. Les chercheurs ont en effet montré que 33 % de l'énergie consommée par une bouilloire sert à chauffer de l'eau inutilement. Si chaque utilisateur européen ne faisait bouillir que la stricte quantité d'eau dont il a besoin, on éviterait l'émission de 4 226 kilotonnes de dioxyde de carbone par an, soit plus du double des émissions de Malte.

LEVALLOIS EN INDE

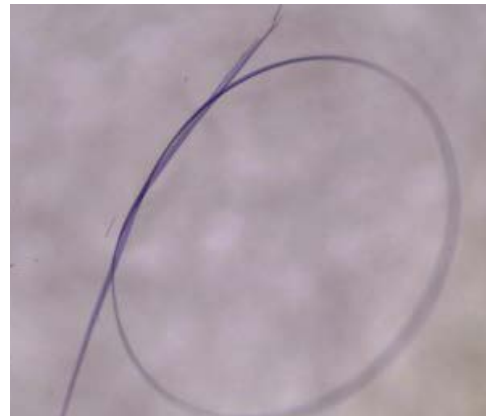
Attirampakkam, en Inde, le débitage Levallois se pratiquait il y a quelque 385 000 ans, a constaté l'équipe de Kumar Akhilesh, préhistorien au centre Sharma, à Chennai. L'apparition de cette technique de taille de la pierre produisant de petits éclats tranchants, dont certains peuvent servir de pointes, est l'un des marqueurs de la fin des cultures acheuléennes typiques du Paléolithique inférieur. Ainsi, le débitage Levallois – ce marqueur d'une transition culturelle d'origine africaine déjà parvenue au Proche-Orient et en Europe il y a 300 000 ans – était déjà présent en Inde il y a près de 400 000 ans. Qui en fut l'initiateur ? Des humains d'origine africaine, c'est certain. Des *Homo sapiens* ? Peut-être, mais cela dépend de la date à laquelle on fait remonter notre espèce, dont le plus vieux fossile date de seulement 320 000 ans.

DES CRISTAUX ÉLASTIQUES

Si la plupart des matériaux cristallins sont durs et cassants, certains font exception et sont dits plastiques. Ils peuvent être tordus, sans se casser, sous de fortes contraintes mécaniques. Mais le diacétylacétonate de cuivre, [un complexe organométallique noté $\text{Cu}(\text{acac})_2$], lui, est exceptionnel : ses cristaux prennent la forme de très longues aiguilles qui sont aussi flexibles qu'un fil de nylon. Anna Worthy, Arnaud Grosjean et leurs collègues de l'université du Queensland, en Australie, ont élucidé le mécanisme qui donne à ce matériau sa souplesse.

Les chercheurs ont étudié des cristaux de $\text{Cu}(\text{acac})_2$ par diffraction aux rayons X. Ils ont obtenu la structure atomique du complexe et la façon dont il s'agence au sein du matériau. Composés d'unités à ion cuivre Cu^{2+} central, entouré de deux ions acétylacétonate riches en électrons, ils ont une structure plane, de forme carrée. Le matériau est ainsi constitué d'un empilement de ces unités, qui réalisent toutes un angle de $41,3^\circ$ par rapport à l'axe de plus grande longueur de ce cristal presque filiforme.

Lorsque le cristal est tordu, cette architecture est globalement conservée et la distance entre les complexes ne varie pas. En revanche, les scientifiques ont observé une très légère rotation de



Grâce à sa structure particulière, le diacétylacétonate de cuivre peut être tordu à volonté et de façon réversible.

chaque structure organométallique sur elle-même : sous contrainte mécanique, l'angle de $41,3^\circ$ peut augmenter, ce qui raccourcit la fibre cristalline, ou au contraire diminuer, ce qui la rallonge. Les modifications sont infinitésimales à l'échelle microscopique, mais, cumulées sur des distances macroscopiques, elles expliquent la grande flexibilité du cristal. Contrairement aux autres cristaux ayant des propriétés plastiques, ce matériau est flexible, c'est-à-dire que ces transformations sont totalement réversibles : si la contrainte mécanique est supprimée, les complexes reprennent leur orientation d'origine. ■

MARTIN TIANO

A. Worthy et al., *Nature Chemistry*, vol. 10, pp. 65-69, 2018

DES SALMONELLES AU MEXIQUE AU XVI^e SIÈCLE

Quelques documents d'époque décrivent une épidémie du nom de «cocoliztli» qui a décimé entre 45 et 60 % des Aztèques du Mexique dans les années 1545-1550. Le pathogène en cause restait à identifier. Pour ce faire, l'équipe de Johannes Krause, de l'institut Max-Planck des sciences de l'histoire humaine, à Iéna, en Allemagne, a utilisé une nouvelle approche de séquençage massif à haut débit d'ADN. Les chercheurs ont utilisé des échantillons trouvés dans les dents de 24 squelettes enterrés dans la zone de l'épidémie. Ils ont ainsi retrouvé la trace d'une salmonelle de sérotype Paratyphi C, qui pourrait avoir joué un rôle dans l'épidémie en question.

Les chercheurs ont aussi mis au jour, sur cette souche, des facteurs de virulence, tels qu'une protéine facilitant l'agrégation bactérienne, qui expliqueraient la mortalité élevée

liée à l'épidémie. Ils émettent donc l'hypothèse que des colons européens, porteurs sains du pathogène, auraient contaminé une population plus fragile. François Xavier Weill, de l'institut Pasteur à Paris, nuance cette conclusion : « Cette interprétation va trop loin. Le débat est ouvert sur la signification pathogénique de la présence de Paratyphi C chez les victimes. De plus, la technique utilisée ne détecte pas les virus à ARN, comme Ebola, qui seraient aussi de bons candidats. » Autre point restant en suspens : l'étude ne permet pas d'infirmer une présence plus ancienne de salmonelles Paratyphi C sur le continent américain, du fait d'un échantillonnage assez modeste. ■

NOËLLE GUILLON

A. Vagene et al., *Nature Ecology and Evolution*, en ligne le 15 janvier 2018

EN IMAGE

ON A SÉQUENCÉ LE GÉNOME GÉANT DE L'AXOLOTL

L'axolotl semble curieux, mais c'est un animal de laboratoire commun. Prélevé dans la nature pour la première fois vers 1800 par le naturaliste et explorateur allemand Alexander von Humboldt, *Ambystoma mexicanum* est élevé en laboratoire depuis 1864. Pourquoi cet animal, un amphibien endémique du Mexique, est-il intéressant? Parce que l'évolution des vertébrés terrestres a commencé par une transformation de certains poissons tétrapodes en amphibiens, de sorte que le corps des amphibiens modernes est organisé d'une façon proche de celle du corps de nos premiers ancêtres terrestres. L'axolotl est en outre une salamandre dont il a les talents naturels, par exemple celui de régénérer un membre sectionné. L'annonce du séquençage de son génome par une équipe dirigée par Eugene Myers, de l'institut Max-Planck pour la biologie cellulaire et la génétique, à Dresde, n'est donc pas une nouvelle anodine.

Elle l'est d'autant moins que l'axolotl est doté d'un génome géant: son ADN est composé de 32 milliards de nucléotides, soit dix fois plus que le génome humain! Dans un tel cas, les répétitions de séquences d'ADN sont légion, ce qui rend très difficile l'association des séquences produites par millions dans les machines de séquençage. Pour reconstituer le génome de l'axolotl, les chercheurs ont donc développé un logiciel, nommé Marvel, qui intègre une correction des superpositions trompeuses de séquences.

Eugene Myers et ses collègues estiment que le génome de l'axolotl contient quelque 23 000 gènes codant des protéines, un peu plus que dans le génome humain. Le reste est en grande partie constitué de séquences répétées. Autre constatation, le gène *Pax3*, qui joue un rôle essentiel dans un stade du développement embryonnaire chez les autres vertébrés terrestres, manque à l'axolotl. Son rôle est, semble-t-il, assuré par un autre gène, *Pax7*. Reste maintenant le plus difficile: comprendre comment les particularités du génome de l'axolotl sont liées aux facultés de régénération de cette salamandre. ■



S. Nowoshilow *et al.*, *Nature*, vol. 554, pp. 50-55, 2018





© Magnetix/Shutterstock.com

SCIENCE DES MATÉRIAUX

DES PLUMES SUPERNOIRES

Le plumage de certains oiseaux de paradis est d'un noir profond et intense, un «supernoir». Dakota McCoy, de l'université Harvard, et ses collègues ont étudié la structure de leurs plumes dont la profondeur du noir rivalise avec celle de certains matériaux artificiels spécialement conçus à cet effet.

L'absorption de la lumière par les pigments du matériau donne les teintes noires. Mais une structuration nano et micrométrique peut optimiser cette absorption. En effet, chaque fois que la lumière atteint une surface, une partie est réfléchi, l'autre est transmise et donc absorbée par le matériau. Ainsi, plus la lumière rencontre de surfaces, plus elle est absorbée et plus le noir obtenu est intense.

Dakota McCoy et ses collègues ont analysé les plumes de cinq espèces d'oiseaux de paradis présentant une couleur «supernoire». Leurs coefficients d'absorption sont compris entre 99,69 % et 99,95 %. Ils rivalisent ainsi avec le Vantablack, un matériau artificiel dont le coefficient d'absorption est de 99,965 %.

Les chercheurs ont analysé la structure de ces plumes. Dans une plume d'un noir normal, les barbules, le réseau de filaments bordant les barbes des plumes, forment un motif de peigne régulier dans un plan. Dans une plume super-



Le paradisier festonné (*Ptiloris paradiseus*), un passereau australien, présente un plumage supernoir.

noire, les barbules sont courbées et sortent du plan de la plume, surtout près de la pointe de celle-ci. Et, plus étonnant, les barbules portent des picots micrométriques. L'ensemble crée un réseau dense de microbranches et de cavités dans lequel la lumière est diffusée un grand nombre de fois. D'où une absorption très efficace.

L'efficacité d'absorption des plumes est aussi directionnelle: d'après les chercheurs, les mâles se positionneraient face aux femelles pour maximiser l'effet «supernoir». ■

S. B.

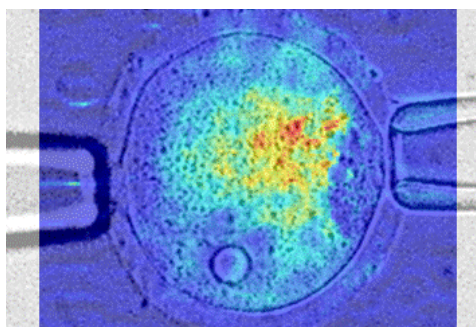
D. E. McCoy et al., *Nature Communications*, vol. 9, article 1, 2018

TECHNOLOGIE

SISMOLOGIE CELLULAIRE

L'élastographie est une technique d'imagerie médicale utilisée pour mesurer l'élasticité des tissus biologiques et pour détecter des pathologies telles que des tumeurs ou des fibroses. Son principe: faire traverser le tissu observé par des ondes de cisaillement, analyser sa réaction et en déduire son élasticité. Pol Grasland-Mongrain, de l'université de Montréal, et ses collègues ont eu l'idée d'adapter cette méthode pour étudier des cellules et passer ainsi de l'échelle centimétrique à l'échelle micrométrique.

Pour y parvenir, ils ont maintenu, à l'aide d'une micropipette, une cellule (un ovocyte de souris) sous un microscope optique muni d'une caméra ultrarapide. Une seconde micropipette, reliée à un dispositif piézoélectrique, était aussi en contact avec la cellule. « Cette pipette vibre



Une micropipette induit des vibrations dans une cellule pour en mesurer l'élasticité.

et induit ainsi des ondes de cisaillement dans toute la cellule», explique l'un des auteurs de l'étude, Stefan Catheline, de l'Inserm à Lyon. L'analyse des déformations de la cellule permet de cartographier l'élasticité de sa structure. Les chercheurs envisagent de nombreuses applications, comme identifier des tumeurs. ■

DONOVAN THIEBAUD

P. Grasland-Mongrain et al., *PNAS*, en ligne le 16 janvier 2018

EN BREF

AUX ORIGINES DE L'ÉLÉPHANT DE BORNEO ?

Deux hypothèses s'affrontaient pour expliquer quand et comment l'éléphant de Borneo est arrivé sur cette île. L'une suggérait une introduction par l'homme au XVIII^e siècle. Mais une analyse d'ADN mitochondrial indiquait, elle, une arrivée il y a 300 000 ans. Lounès Chikhi, de l'université Paul-Sabatier, à Toulouse, et ses collègues ont réalisé une nouvelle étude qui conclut que l'éléphant est arrivé lors de la dernière glaciation (il y a entre 18 300 et 11 400 ans), à une époque où le niveau des mers était bas.

UN LANCEUR SUPERPUISSANT

L'entreprise SpaceX, du milliardaire et entrepreneur Elon Musk, a réussi le premier décollage de son nouveau lanceur, Falcon Heavy, dont les boosters se sont posés au sol avec succès (contrairement au corps central qui s'est écrasé en mer accidentellement). Cette récupération des éléments de la fusée diminue les coûts du lanceur. La charge utile est de 68,3 tonnes en orbite basse et 26,7 tonnes en orbite de transfert géostationnaire. Ce qui en fait le plus puissant lanceur actuel.

DU BOIS DUR COMME DE L'ACIER

Jianwei Song, de l'université du Maryland, et ses collègues ont développé une nouvelle méthode pour densifier le bois et le rendre très résistant: grâce à un traitement chimique suivi d'un chauffage sous forte pression, de nombreuses liaisons hydrogène s'établissent entre les molécules de cellulose. La rigidité est ainsi multipliée par 11, la dureté par 10. La résistance à l'humidité est aussi accrue. De quoi envisager de nombreuses applications.

BIOLOGIE ANIMALE

LA LEÇON DU MOUSTIQUE

Chassez un moustique, il apprendra... à vous fuir. C'est ce qu'ont montré Clément Vinauger, de l'université de Washington, à Seattle, et ses collègues en exposant des moustiques *Aedes aegypti* à l'odeur d'un humain et à un choc mécanique simulant une défense vigoureuse. Les moustiques étaient par la suite fortement repoussés par cette odeur. Les chercheurs suspectaient un neurotransmetteur, la dopamine, d'intervenir dans cet apprentissage. Pour le vérifier, ils ont renouvelé leur expérience avec des moustiques mutants chez lesquels le récepteur de la dopamine le plus abondant était neutralisé. Malgré les chocs reçus, les moustiques étaient toujours attirés par l'odeur humaine ! La dopamine serait donc un élément clé de cet apprentissage. Et s'acharner contre le moustique qui hante vos nuits ne serait pas complètement vain... ■

CLAIRE HETZ

C. Vinauger et al., *Current Biology*, vol. 28(3), pp. 333-344, 2018

ASTROPHYSIQUE

EXOPLANÈTE ATYPIQUE

Un Jupiter chaud est une exoplanète semblable à Jupiter, mais très proche de son étoile. Du fait des forces de marée que cette dernière exerce, la planète est en verrouillage gravitationnel et présente toujours la même face à son étoile, tout comme la Lune montre toujours le même côté à la Terre. Par ailleurs, la face éclairée du Jupiter chaud est beaucoup plus chaude que celle dans l'ombre. Mais la zone la plus chaude de la surface n'est pas le point sub-stellaire (le point situé face à l'étoile), car des vents violents la décalent vers l'est. C'est du moins ce qui avait été constaté sur bon nombre de Jupiters chauds. Toutefois, Lisa Dang, de l'université McGill, à Montréal, et ses collègues ont découvert une exception, l'exoplanète CoRoT-2b.

Pour expliquer le décalage vers l'ouest de sa zone la plus chaude, une hypothèse est que la planète n'est pas encore totalement verrouillée, mais d'autres pistes sont aussi considérées. Des hypothèses à explorer pour mieux comprendre ces planètes extrêmes. ■

LUCAS STREIT

L. Dang et al., *Nature Astronomy*, en ligne le 22 janvier 2018

ARCHÉOLOGIE

LA PLUS ANCIENNE TOMBE SCYTHE



Le tumulus d'Arzhan 0 est situé dans la partie de la Sibérie où serait née la culture des Scythes. La tombe circulaire se distingue du paysage marécageux qui l'entoure par les végétaux qui y poussent.

L'archéologie progresse pour montrer que la culture des Scythes – un peuple de cavaliers nomades – est née il y a quelque 3000 ans en Sibérie. Avec des collègues, Gino Caspari, de l'université de Berne, a réussi à identifier la plus ancienne tombe princière scythe de Sibérie jamais trouvée. Elle remonte à l'âge du Bronze.

Cette structure circulaire d'environ 150 mètres de diamètre est isolée en terrain marécageux, à cinq heures de progression difficile en véhicule tout-terrain du plus proche point habité. Après avoir vérifié sur des images satellitaires qu'elle ressemble à un kourgane – c'est-à-dire, en russe, à un tumulus funéraire –, les chercheurs sont allés sur place pour la sonder. Ils ont pu prouver que ce tumulus, nommé Arzhan 0, a la même structure qu'Arzhan 1, situé à 10 kilomètres au nord-est. Or Arzhan 1 est d'une importance majeure, car c'est après sa fouille, dans les années 1970 par l'archéologue soviétique Mikhail Gryaznov, que l'on a commencé à comprendre où chercher les origines de la culture scythe : en Sibérie, du côté du haut plateau traversé par la rivière Uyk.

Arzhan 1 a été pillé, mais les chercheurs soviétiques ont établi qu'un prince et sa compagne y ont été inhumés accompagnés de très riches offrandes funéraires après un énorme banquet au cours duquel des personnes et des centaines de chevaux ont été sacrifiés. Arzhan 1, qui date du tournant du IX^e et du VIII^e siècles avant notre ère, passait pour la plus ancienne tombe princière scythe connue, mais la datation des bois trouvés à l'intérieur d'Arzhan 0 a révélé que cette tombe est antérieure et remonte au IX^e siècle avant notre ère.

En outre, son contenu pourrait être intact, puisqu'en réalisant leur sondage, les chercheurs ont trouvé un sol en partie gelé. Arzhan 2, un kourgane de l'âge du Fer datant du VII^e siècle avant notre ère, donne une mesure des trésors qui reposent peut-être à Arzhan 0 : les archéologues allemands qui ont fouillé cette tombe au début des années 2000 y ont trouvé plus d'un millier d'objets d'or autour des deux défunts exhumés. Outre des armes magnifiquement ornées, les offrandes funéraires comprenaient des vases et des chevaux harnachés. Un collier en or massif pesait pas moins de deux kilogrammes. Que livrera Arzhan 0 ? À suivre ! ■

F. S.

G. Caspari et al., *Archaeological Research in Asia*, en ligne le 11 novembre 2017

GÉNÉTIQUE

DES SÉQUENCES D'ADN PAS SI INUTILES

Certaines chaînes de nucléotides, conservées à l'identique dans le génome de différentes espèces, ne semblaient pas indispensables. Une étude vient de démentir cette idée.

Le dernier ancêtre commun à l'homme, à la souris et au rat vivait il y a environ 80 millions d'années. Pourtant, on retrouve dans les génomes de ces vertébrés de longues séquences d'ADN d'au moins 200 paires de nucléotides qui ont été conservées à l'identique au cours de l'évolution. Or plus de la moitié de ces séquences «ultraconservées» ne correspondent pas à l'ADN de gènes codant des protéines, mais à de l'ADN dit non codant. Une équipe menée par Diane Dickel, du Laboratoire Lawrence-Berkeley, aux États-Unis, a montré que la suppression de séquences ultraconservées chez les souris, si elle n'affecte pas leur viabilité et leur fertilité, altère néanmoins leur développement.

«La pression de sélection, au cours de l'évolution, tend à conserver des séquences aux fonctions essentielles, dont la perturbation est délétère, conduisant par exemple à la mort ou à la stérilité de l'organisme», explique Frédérique Peronnet, de l'IBPS (institut de biologie Paris-Seine). C'est pourquoi, en 2007, les chercheurs d'une équipe californienne furent les premiers surpris lorsqu'ils constatèrent que les lignées de souris chez qui on avait supprimé quatre de ces séquences ultraconservées (suppression d'une séquence différente pour chaque lignée) étaient à la fois viables et fertiles.

En partant notamment de ce résultat, Diane Dickel et ses collègues ont voulu vérifier dans quelle mesure la suppression de ces séquences ultraconservées ne provoquait pas d'altération chez la souris. Pour cela, ils se sont intéressés à quatre séquences ultraconservées situées sur le chromosome X, à proximité plus ou moins grande du gène *Arx*. Les séquences étudiées sont des «amplificateurs» de ce gène, c'est-à-dire qu'elles gouvernent son expression. Le gène *Arx*, quant à lui, joue un rôle important au cours du développement cérébral. Or il arrive que des amplificateurs soient efficaces *in vitro*, mais que, *in vivo*, leur perte ne soit pas aussi dommageable pour le développement.

En utilisant la technique d'édition génomique CRISPR-Cas9, les chercheurs ont supprimé, chez des souris, soit l'un des quatre amplificateurs, soit des combinaisons de deux d'entre eux. Les souris présentaient alors un



La suppression de certaines séquences d'ADN non codant, mais ultraconservées, auraient bien une influence négative sur le développement.

481

C'EST LE NOMBRE DE SÉQUENCES D'ADN COMPORTANT PLUS DE 200 PAIRES DE BASES QUI SONT PARFAITEMENT CONSERVÉES À LA FOIS CHEZ L'HUMAIN, LE RAT ET LA SOURIS.

retard de croissance fœtale ou une anomalie du développement cérébral. Et quand on supprimait une paire d'amplificateurs, l'effet sur le développement cérébral était plus marqué. D'après Diane Dickel et ses collègues, la perte de ces séquences ultraconservées entraînerait une altération du développement, difficilement décelable à l'échelle du laboratoire; cependant, une sélection négative s'exercerait probablement contre ces phénotypes à l'échelle de l'évolution.

«Ces résultats montrent qu'une séquence qui se conserve parfaitement ne correspond pas nécessairement à une fonction essentielle», souligne Frédérique Peronnet. «C'est une réponse cinglante à l'idée que la suppression des séquences ultraconservées n'avait pas d'impact», déclare quant à lui Stanislas Lyonnet, directeur de l'institut des maladies génétiques Imagine, à Paris. «Néanmoins, il faut être prudent et ne pas généraliser immédiatement. L'équipe de Diane Dickel a choisi un endroit bien précis sur le chromosome X, qui comporte plusieurs séquences ultraconservées. Il faut poursuivre les recherches pour voir si d'autres séquences ont une importance semblable partout dans le génome humain.» ■

ALINE GERSTNER

D. Dickel *et al.*, *Cell*, vol. 172, n° 3, pp. 491-499, 2018

LA SIGNATURE DU PIC ÉPEICHE

On peut reconnaître individuellement de nombreux oiseaux par leur chant ou par d'autres bruits qu'ils produisent. Michał Budka, de l'université Adam Mickiewicz, à Poznań, en Pologne, a montré que le tambourinage – brève succession de coups de bec sur un tronc d'arbre – permet de distinguer des pics épeiches entre eux. Les différences se traduisent dans la durée séparant deux coups successifs et le nombre de coups par séquence de tambourinage. Ces tambourinages servent à attirer un partenaire ou à marquer le territoire.

ENGRAIS ET PROLIFÉRATION DES MOUSTIQUES

Sous-pots de fleurs, citernes, rizières... Ces endroits sont des sites privilégiés par les moustiques pour pondre leurs œufs, car la matière organique qui s'y trouve sert de nourriture aux futures larves. Frédéric Darriet, de l'IRD à Montpellier, a montré en laboratoire que la présence d'engrais dans le milieu augmente sa biomasse et profite ainsi aux larves des espèces *Aedes aegypti* et *Anopheles gambiae*. Ces vecteurs de maladies se développent alors plus vite et en plus grand nombre.

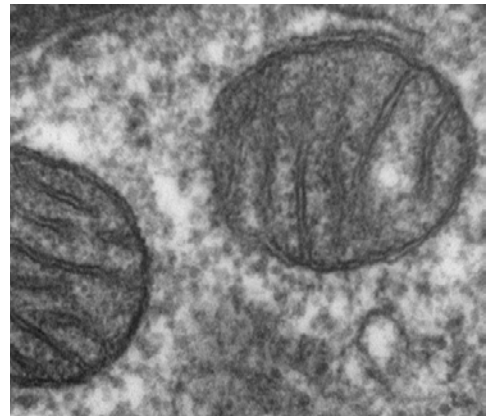
ÇA CHAUFFE CHEZ LES MITOCHONDRIES

En « brûlant » les glucides consommés par l'organisme, les mitochondries des cellules humaines contribuent à maintenir la température du corps à 37,5 °C. Pierre Rustin, de l'Inserm, et ses collègues ont été surpris de découvrir que ces mitochondries fonctionnent en fait à 50 °C. Comment ont-ils fait ? Les chercheurs se sont servis de molécules (dénommées Mito Thermo Yellow) dont les propriétés de fluorescence sont sensibles à la température. De véritables thermomètres moléculaires !

VERS UNE CHIMIE PRIMITIVE?

Essentiel à la vie des organismes consommant de l'oxygène, le cycle de Krebs, ou cycle de l'acide citrique, est chargé de transformer les molécules carbonées pour produire de l'énergie. Comment un tel cycle a-t-il pu s'amorcer chez les tout premiers organismes vivants ? Dans les années 1990, le chimiste allemand Günter Wächtershäuser a émis l'hypothèse qu'une version inversée de ce cycle aurait pu exister il y a plusieurs milliards d'années. Elle aurait produit les premiers blocs moléculaires nécessaires à l'apparition de la vie. Cependant, l'actuel cycle de l'acide citrique a besoin de molécules biologiques pour fonctionner (huit enzymes catalytiques), ce qui ne pouvait pas être le cas des cycles primitifs. Greg Springsteen, de l'université Furman, Ramanarayanan Krishnamurthy, de l'institut Scripps, aux États-Unis, et leurs collègues ont mis en évidence un cycle chimique qui aurait pu fonctionner dans les conditions de la Terre primitive pour produire des molécules utilisables par le vivant.

Les chercheurs ont d'abord sélectionné des molécules prébiotiques relativement simples, l'ion malonate et l'ion glyoxylate. Comme substitut aux enzymes actuelles facilitant les réactions d'oxydoréduction, ils ont utilisé le peroxyde d'hydrogène (ou eau oxygénée), un



Les mitochondries sont les organites au sein desquels le cycle de Krebs produit l'énergie nécessaire à la cellule.

produit de l'oxydation photochimique de l'eau. Les chimistes ont alors observé deux cycles de réactions qui produisent un grand nombre de composés intermédiaires, par exemple de l'oxaloacétate qui entre dans l'actuel cycle de Krebs, dans le cycle de l'urée et dans la synthèse de l'aspartate, un acide aminé. Ces cycles opèrent à un pH compris entre 7 et 8,5 et à une température inférieure à 50 °C, des valeurs compatibles avec les estimations des conditions à la surface de la Terre primitive. Ils auraient donc pu synthétiser les éléments nécessaires pour amorcer les cycles biochimiques actuels. ■

LAMBERT BARAUT-GUINET

G. Springsteen et al., *Nature Communications*, vol. 9, article 91, 2018

TECHNOLOGIE

DE VRAIES IMAGES EN 3D

Daniel Smalley, de l'université Brigham Young, aux États-Unis, et ses collègues ont conçu un dispositif permettant de dessiner des images dans l'air libre.

Les chercheurs font appel à l'effet dit photophorétique pour maintenir en l'air, à l'aide d'un laser, une minuscule particule de cellulose. Un dispositif optique focalise un faisceau laser sur une zone en y créant une intensité non uniforme. La particule, déposée dans cette zone, se place alors spontanément là où l'intensité lumineuse est minimale. Si elle s'écarte de ce point, elle entre dans une région où l'intensité est plus élevée; la particule chauffe localement, et il résulte de son interaction avec l'air ambiant une force qui la ramène vers le point d'intensité minimale. En déplaçant le faisceau, on déplace alors la particule – qu'on éclaire avec un autre laser – et on



Ce papillon a été dessiné dans l'air, au-dessus d'un doigt pour donner l'échelle.

peut ainsi dessiner le contour de n'importe quel objet en 3D. Si le mouvement est rapide, on perçoit tout le contour grâce à la persistance rétinienne. Pour les chercheurs, ce prototype est un point de départ pour créer des dispositifs d'imagerie 3D, aux applications nombreuses. ■

S. B.

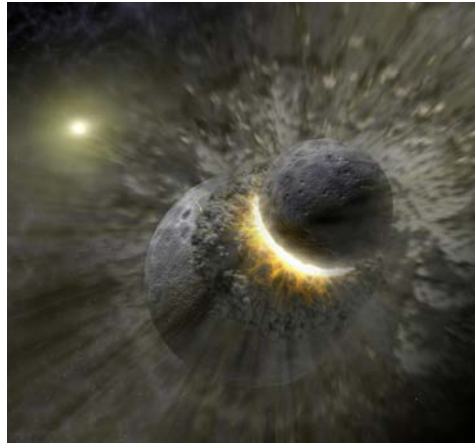
D. E. Smalley et al., *Nature*, vol. 553, pp. 486-490, 2018

GÉOSCIENCES

THÉIA, UN POIDS PLUME

Depuis le début des années 1970, un scénario de la naissance de la Lune s'est imposé : notre satellite serait né de la collision de la Terre avec un planétésimal, nommé Théia, entre 30 et 100 millions d'années après la formation du Système solaire. Le nuage de débris projetés lors du choc se serait rapidement aggloméré pour former la Lune. Toutefois, il restait à comprendre pourquoi la Terre et la Lune ont une composition isotopique très similaire, alors que ce n'était très probablement pas le cas de Théia. Cette énigme restait sans réponse depuis l'analyse des échantillons rapportés par les astronautes des missions *Apollo*.

Pour comprendre pourquoi les compositions sont identiques, James Badro, de l'Institut de physique du globe de Paris, et deux collègues ont simulé la formation de la Terre avec l'accrétion de météorites, la présence d'un océan de magma global en surface et la différenciation du manteau rocheux et du noyau de fer. Ils ont pris soin de reproduire la dynamique des éléments sidérophiles (fer, nickel, cobalt, chrome et vanadium), qui se lient facilement au fer et qui ont été entraînés vers le noyau, et des éléments lithophiles, qui sont restés dans la roche du manteau.



La Lune est née d'une collision de la Terre avec un corps, Théia, de masse comparable à celle de Mars.

L'impact de Théia, le dernier épisode d'accrétion majeur, a été la dernière étape dans l'évolution de la composition géochimique du manteau terrestre. Celle-ci dépend notamment de la masse de Théia, que les chercheurs ont utilisée comme paramètre dans leurs simulations. Pour obtenir une composition isotopique du manteau terrestre en accord avec les observations, les chercheurs ont montré que l'impacteur devait avoir une masse inférieure à 15% de la masse de la Terre, soit environ la masse de la planète Mars. ■

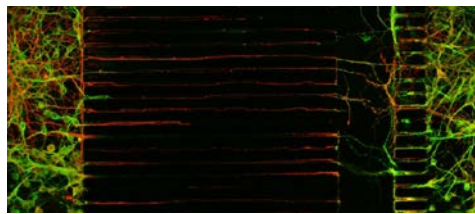
S. B.

H. Piet et al., *Geophysical Research Letters*, vol. 44(23), pp. 11770-11777, 2017

BIOLOGIE

MICROFLUIDIQUE ET HUNTINGTON

La maladie de Huntington, d'origine génétique, touche environ 6000 personnes en France et en concerne 12000 autres, porteurs sains. Elle entraîne des troubles cognitifs, psychiatriques et des mouvements incontrôlés. Elle se caractérise par un dysfonctionnement du circuit neuronal corticostriatal. « Une région du cerveau, le striatum, dégénère. On a longtemps considéré Huntington comme une maladie du striatum. En fait, des neurones du cortex s'y projettent et créent des connexions synaptiques avec le striatum. C'est cet axe que nous avons voulu étudier », explique Frédéric Saudou, de l'université Grenoble-Alpes. Pour ce faire, ce chercheur et ses collègues ont fait pousser des neurones du cortex et du striatum de souris saines ou modèles de la maladie, connectés, sur une puce microfluidique.



Réseau neuronal dans une puce microfluidique. Les neurones à gauche se connectent par leurs axones (en rouge) aux neurones à droite.

L'équipe a ainsi montré que des neurones du cortex atteints sont suffisants pour induire les dysfonctionnements du circuit, malgré des neurones du striatum sains. À l'inverse, des neurones du cortex sains sont capables de « sauver » des neurones du striatum malades. Il faudrait donc envisager de traiter les deux zones alors que, pour le moment, tous les essais de thérapie se concentrent sur le striatum. ■

N. G.

A. Virlogeux et al., *Cell Reports*, vol. 22(1), pp. 110-122, 2018

EN BREF

ÉPONGE ÉCONOME EN OXYGÈNE

Les éponges sont l'une des premières formes de vie animale. Or Gert Wörheides, de l'université de Munich, a constaté avec surprise que l'éponge marine *Thetia wilhelma* survit même si la concentration d'oxygène dissous dans l'eau n'est que de 0,25 % de la concentration actuelle. Une observation qui suggère que les premières éponges ont vécu dans un environnement très pauvre en oxygène.

LES GÈNES DE L'HOMME DE CHEDDAR

L'« Homme de Cheddar » est un fossile humain vieux de 10 000 ans, découvert en 1903 dans la grotte de Gough, en Angleterre. Le séquençage de son ADN est en cours, mais les chercheurs du Muséum d'histoire naturelle de Londres ont déjà révélé que cet homme avait les yeux bleus, la peau noire et les cheveux foncés. Ainsi, les variants génétiques à l'origine de la peau claire des Européens, et en particulier des Britanniques, semblent n'être parvenus dans les îles atlantiques que bien après l'époque où vécut l'Homme de Cheddar.

COMBUSTION DU CHARBON : PAS D'ACCALMIE EN VUE

Même si la Chine et l'Inde ont décidé de construire deux fois moins de centrales électriques au charbon que ces États ne l'avaient prévu encore récemment, cette baisse est compensée par de nouvelles constructions au sein des pays à économie émergente tels que l'Indonésie ou le Viêt Nam, ou à économie déjà développée, tels que la Turquie. C'est ce qu'ont établi des chercheurs de l'institut de recherche Mercator, à Berlin. Les nouvelles centrales prévues pourraient ajouter quelque 150 gigatonnes de carbone aux 500 gigatonnes déjà émises dans l'atmosphère par le parc mondial existant.

GÉOPHYSIQUE

GLISSADES DE GLACIERS

En juillet et en septembre 2016, des **avalanches spectaculaires se sont produites au Tibet**, dans la région d'Aru: deux volumineux glaciers ont dévalé plusieurs kilomètres sur des pentes relativement peu inclinées. Andreas Kääb, de l'université d'Oslo, en Norvège, et ses collègues suggèrent qu'une combinaison de facteurs a produit ces événements rares: l'augmentation de la pression au sein des glaciers (de la glace s'étant accumulée dans leurs parties supérieures), des précipitations exceptionnelles, un sol propice au glissement et l'augmentation importante de la fonte de surface depuis 2010. Dans un contexte de changement climatique, l'augmentation de la fonte de surface apporte un surplus d'eau liquide à la base des glaciers. Un phénomène qui pourrait déstabiliser le socle d'autres glaciers et provoquer leur effondrement. ■

S.B.

A. Kääb et al., *Nature Geoscience*, vol. 11, pp. 114-120, 2018

PHYSIQUE

L'ŒIL DU CYCLONE A SES CRITÈRES



Le cyclone Isabel photographié depuis la Station spatiale internationale, en 2003. L'œil du cyclone correspond au trou sans nuages.

MICROBIOLOGIE

CHOLÉRA ET MICROBIOTE

L'agent *Vibrio cholerae* est responsable des épidémies de choléra qui tuent encore 100 000 personnes dans le monde chaque année. Cette bactérie ne passe pas dans la circulation sanguine, mais reste dans le système digestif. Elle libère des toxines qui empêchent les parois des intestins d'absorber de l'eau, d'où des diarrhées pouvant entraîner en quelques heures la mort, par déshydratation. Mais pour cela, *Vibrio cholerae* doit se faire une place parmi les bactéries commensales de l'intestin, ces organismes bénins et même nécessaires au système digestif. Une équipe de la faculté de médecine de Harvard, aux États-Unis, menée par Wenjing Zhao, a montré que la bactérie présente des organites lui permettant d'injecter des protéines toxiques à travers la membrane d'autres bactéries, et de diviser ainsi par 300 la population d'*Escherichia coli* bénignes de l'intestin grêle, l'une des principales bactéries qui peuplent nos intestins. ■

M. T.

W. Zhao et al., *Science*, vol. 359, pp. 210-213, 2018

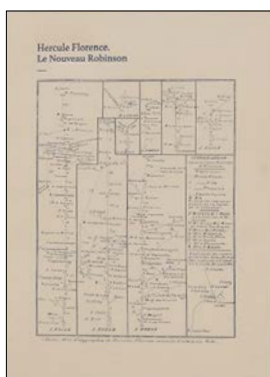
Phénomènes atmosphériques spectaculaires et puissants, les cyclones tropicaux provoquent d'importants dégâts lorsqu'ils traversent des régions habitées. Les vents y soufflent jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres par heure. Pourtant, au centre de ces tempêtes se forme parfois une zone calme où les vents sont très faibles: l'œil du cyclone. Ce dernier est entouré d'un «mur», où les vents sont particulièrement violents. Les conditions de formation de l'œil et du mur étaient jusqu'à présent mal comprises. Emmanuel Dormy, de l'École normale supérieure, à Paris, et ses collègues ont simulé des cyclones et ont mis en évidence les conditions nécessaires pour qu'un œil se forme.

Leur modèle simplifié consiste en un volume cylindrique d'air en rotation où la couche la plus basse (au niveau de l'océan) est assez chaude pour provoquer des mouvements de convection. Les chercheurs ont notamment étudié les effets de trois grandeurs qui caractérisent un écoulement: le nombre de Reynolds, le nombre de Rossby et le nombre d'Ekman. Le premier caractérise le type d'écoulement (s'il est laminaire ou turbulent) et correspond au rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses du fluide. Le deuxième est le rapport entre les forces d'inertie et la force de Coriolis, liée à la rotation du système. Enfin, le nombre d'Ekman est le rapport des deux nombres précédents et mesure donc l'atténuation du mouvement du fluide par la viscosité.

Emmanuel Dormy et ses collègues ont montré qu'un nombre de Reynolds trop petit (vents trop faibles) empêche la formation du mur. Ils montrent aussi qu'il existe une borne supérieure sur le nombre de Rossby. La force de Coriolis doit être assez importante (supérieure aux forces inertielles et de viscosité) pour structurer le mur. Néanmoins, le nombre de Rossby ne peut pas être trop faible non plus, sans quoi la couche de fluide la plus basse ne peut pas s'élever et former le cône du mur, et donc l'œil du cyclone. ■

S.B.

L. Oruba et al., *Physical Review Fluids*, vol. 3, 013502, 2018



SCIENCE ET SOCIÉTÉ

TRAITÉ DE DROIT ET D'ÉTHIQUE DE LA ROBOTIQUE CIVILE

Nathalie Nevejans
LEH Édition, 2017
1230 pages, 92 euros

Les questions de droit et d'éthique posées par les robots nous entraînent souvent dans la science-fiction. Doit-on programmer dans les robots les fameuses lois d'Isaac Asimov? Sera-t-il acceptable de débrancher et de détruire un robot conscient?

Les robots actuels, bien qu'ils surpassent les meilleurs humains pour certaines tâches spécialisées, n'ont pas encore de véritable intelligence. Pour autant, ils posent une multitude de problèmes juridiques et éthiques d'actualité. C'est ce que nous détaille le livre de Nathalie Nevejans, œuvre de synthèse à la fois passionnante, concrète et précise.

La protection de l'être humain contre toute atteinte par un robot résulte du droit au respect, à l'inviolabilité et à l'intégrité des personnes; elle nous concerne dès maintenant. Ce thème est important pour les robots au service de personnes malades ou âgées, et cela même lorsqu'il s'agit de robots aux capacités d'analyse réduites. Le robot doit être conçu pour ne pas brusquer ou blesser les sujets humains qu'il aide et assiste.

Se pose aussi le problème des sanctions pénales pour des atteintes corporelles résultant des actions d'un robot. Comment les déterminer et à qui doivent-elles s'appliquer? Aux concepteurs du robot? À ceux qui en font la maintenance? Au propriétaire qui en fait l'usage?

Autre question: doit-on considérer qu'un individu peut refuser d'être pris en charge par un robot ou simplement en contact avec lui? Est-ce un droit absolu? Nombre d'autres questions se posent. Ce traité ouvre les portes et pose les bases d'une discipline centrale pour notre avenir.

JEAN-PAUL DELAHAYE / UNIVERSITÉ DE LILLE

HISTOIRE DES SCIENCES

HERCULE FLORENCE, LE NOUVEAU ROBINSON

Linda Fregni-Nagler (dir.)
Humboldt Books, 2017
384 pages, 45 euros

Même s'il n'a pas été naufragé sur une île déserte, l'inventeur et peintre Hercule Florence peut bien être qualifié de «nouveau Robinson»: il a passé sa vie dans un isolement culturel total, même si cet exil fut plus ou moins volontaire.

Né de mère monégasque, Hercule Florence a embarqué en 1824 à Toulon sur un vaisseau de la marine française pour débarquer à Rio au terme d'une traversée d'un mois et demi. Il ne reviendra voir sa famille que trente ans plus tard.

En raison de l'éloignement d'Hercule Florence du monde scientifique occidental, ses travaux et inventions sont restés ignorés et n'ont été redécouverts que récemment. Excellent dessinateur et aquarelliste, il participa dès son arrivée au Brésil à une expédition scientifique russe dont les résultats n'ont malheureusement pas été publiés.

Dès 1832, plusieurs années avant la découverte de Daguerre, il s'est intéressé à la fixation des images par la lumière et inventa le mot «photographie». Son manuscrit *Photographie ou Imprimerie à la lumière* est retranscrit ici dans son intégralité. Esprit curieux et ingénieux, il développa un système bioacoustique, qu'il nomma zoophonie, pour transcrire les vocalisations animales. Mentionnons aussi son intérêt pour la monnaie et ses essais pour créer un papier-monnaie efficace.

Afin de subvenir aux besoins de sa famille, il géra une plantation de café, s'intégrant dans une société dont certaines pratiques, comme la destruction de la forêt et surtout l'esclavage, le mettaient mal à l'aise. Il a malgré tout laissé de ce monde des dessins et aquarelles qui sont aujourd'hui d'un grand intérêt documentaire. Il est heureux que justice soit rendue à ce personnage fascinant, auquel le Nouveau Musée national de Monaco a consacré une exposition en 2017, en partenariat avec des collections du Brésil.

NADINE GUILHOU / UNIV. DE MONTPELLIER

HISTOIRE DES SCIENCES

LA SCIENCE EN FRANCE

Jean-Pierre Poirier
et Christian Labrousse

Jean-Cyrille Godefroy, 2017
1504 pages, 55 euros

Cet imposant « Dictionnaire biographique des scientifiques français de Pan mille à nos jours » rassemble plus de 3000 notices de personnages ayant contribué au développement des sciences en France, à un niveau ou à un autre. Certains de ces scientifiques sont illustres ; d'autres ont été écartés, au mieux ignorés, par l'histoire.

L'entreprise, par son ambition et son envergure, n'a d'autre objectif que de nous faire partager la passion de la découverte, car la curiosité qui animait ces savants anime aussi les auteurs. Las de chercher ici ou là des informations, ils se sont résolus à réaliser ce qu'ils auraient voulu avoir sous la main. Bien des sources sont autorisées, d'autres le sont moins, mais qu'importe : le propos attire et l'on se prend au jeu.

Le premier intérêt de l'ouvrage réside dans la présentation de nombreux contemporains, ceux ou celles qui ont marqué ces dernières décennies, dont nous avons entendu parler mais que nous ne connaissons pas vraiment.

Un autre intérêt, et non des moindres, est constitué par les dizaines de notices sur des femmes de science, de l'Antiquité à nos jours. De la brillante Héloïse à la discrète mais efficace Marie Meurdrac, de Marie Curie à notre contemporaine Emmanuelle Charpentier (coauteure de la technique CRISPR-Cas9 pour modifier l'ADN), on mesure tout ce que l'humanité a perdu en muselant les femmes. Si leur nombre ne se compare guère à celui des hommes, ce dictionnaire montre qu'elles sont toujours présentes et qu'elles occupent parfois les premières places dans certaines disciplines.

Un ouvrage à mettre entre toutes les mains et qui suscitera peut-être de nouvelles vocations scientifiques.

DANIELLE FAUQUE / GHDSO, ORSAY

MÉDECINE

LA CONSULTATION

Jean-Christophe Weber

PUF, 2017
176 pages, 12 euros

L'évolution actuelle de la médecine, technocratique, managériale, administrativement contrainte et technologiquement dépendante, nous a de plus en plus éloignés d'un exercice authentiquement humain : la plainte d'un être humain, de l'homme en souffrance, a du mal à se faire entendre. Et nous, médecins, que sommes-nous dans nos tentatives de réponse à cette plainte ?

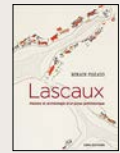
Partant de la consultation

qui fonde la relation soignant-soigné, Jean-Christophe Weber, chef de service de médecine interne au CHU de Strasbourg, livre une analyse à la fois ontologique, philosophique et sociologique de cette relation, et pose quelques jalons pour l'avenir.

Moment premier et privilégié de la relation, la consultation demeure ambivalente : expérience singulière ou standardisée ? Artisanat créatif sans garantie sur la méthode ni sur les résultats escomptés, ou acte rigoureux, encadré et réglementé ? Alors que la maladie introduit chez le patient une fracture dans la perception de son unicité corporelle, la consultation tend à accentuer cette dichotomie en ne se focalisant que sur l'objet de la plainte, renforçant l'inadéquation entre le discours savant d'un côté et l'expérience charnelle de l'autre. On oublie ainsi que la relation soignant-soigné touche la globalité du malade. Car le corps est un langage qu'il faut savoir déchiffrer : corps « objet » ou corps « sujet » ? Or, là où il n'attend qu'une confirmation objective et rassurante de son examen, c'est toute la complexité angoissante des multiples facettes du corps souffrant que le médecin doit accueillir. C'est tout l'enjeu de la médecine d'aujourd'hui et de son devenir.

BERNARD SCHMITT / CERNH, LORIENT

ET AUSSI



LES OISEAUX
Charles Brongniart
Villarsrose, 2017
192 pages, 12 euros

La maison d'édition VillaRose a pour ligne éditoriale de faire apprécier les plumes des chercheurs du passé. Elle nous propose ici de découvrir comment celle de Charles Brongniart, grand botaniste du XIX^e siècle, décrivait les oiseaux. Cet extrait de son *Histoire naturelle populaire* de 1872, somptueux et simple, est l'occasion d'apprendre à regarder les oiseaux et la nature comme savaient bien le faire les naturalistes du passé, eux qui n'étaient pas encore monopolisés par la biologie moléculaire...

MÉCANIQUE QUANTIQUE III
Claude Cohen-Tannoudji,
Bernard Diu et Franck Laloe

CNRS Éditions/EDP Sciences, 2017
776 pages, 55 euros

La bible des étudiants francophones qui apprennent la physique quantique à un niveau sérieux est le « Cohen-Tannoudji », surnom abrégé des deux épais volumes publiés il y a plus de quarante ans et qui ont gardé toute leur pertinence. Le troisième tome, rédigé par les mêmes auteurs avec le même soin et selon un schéma d'organisation identique, vient de paraître. Théorie quantique des champs, processus photoniques, corrélations et intrication de particules, etc. : bon nombre des développements modernes n'auront plus de secrets pour l'apprenti physicien, voire le chercheur, qui fera l'effort de lire (et travailler) ce volume. Lequel fera sans doute date, comme les précédents.

LASCAUX
Romain Pigeaud
CNRS Éditions, 2017
192 pages, 22 euros

Ce livre a été très bien écrit par un préhistorien, lui-même attaché à l'étude d'une grotte ornée de Mayenne, la grotte Margot. Dans ces pages joliment illustrées, notamment par des aquarelles de Jean-Claude Golvin, sur le « Lascaux réel », celui des artistes et celui des préhistoriens, Romain Pigeaud synthétise « tout ce qu'il faut savoir sur la grotte ornée la plus célèbre du monde. » Ses lecteurs pourront enfin se faire une religion sur la question qui taraude encore les préhistoriens : Lascaux est-elle solutréenne ou magdalénienne ? Solutréenne, à en croire l'auteur.

PARIS

JUSQU'AU 19 AOÛT 2018

Cité des sciences et de l'industrie
www.cite-sciences.fr

Effets spéciaux, crevez l'écran!



Explosions spectaculaires, courses-poursuites vertigineuses, personnages évoluant dans des paysages irréels, animaux imaginaires, faux cadavres très réalistes... le cinéma d'aujourd'hui ne serait pas ce qu'il est sans les « effets spéciaux » permettant de créer de telles scènes et de faire illusion auprès des spectateurs.

Mais comment fait-on? On découvrira ici une partie des procédés artistiques et tech-

niques utilisés ainsi que les métiers impliqués dans la production d'effets spéciaux. Et ce à travers un parcours dans les quatre étapes de la chaîne de production audiovisuelle – le bureau de reproduction où scénario et storyboards sont préparés, le plateau de tournage, le studio de postproduction et la salle de cinéma. Bien sûr, de nombreux extraits de films viennent à l'appui, ainsi que plusieurs dispositifs interactifs. ■

RENNES

JUSQU'AU 2 SEPTEMBRE 2018

Espace des sciences
Les Champs Libres
www.espace-sciences.org

Nuit



Au fil de leur parcours, les visiteurs de cette exposition découvriront une quinzaine d'animaux en position de sommeil, puis chemineront dans une forêt fictive peuplée d'une trentaine d'animaux nocturnes variés, avant de se pencher sur le sommeil des humains – et sur la pollution lumineuse qui le perturbe. ■

PARIS

JUSQU'AU 31 AOÛT 2018

Aquarium tropical – Palais de la Porte Dorée
www.aquarium-tropical.fr

Cyclops, explorateur de l'océan



Destinée aux enfants âgés de 6 à 10 ans, cette exposition ludique, mais scientifique, propose de voyager à la découverte des océans – le plancton, le milieu polaire, les abysses, le littoral, les récifs coralliens... Le tout en compagnie du guide Cyclops, un tout petit crustacé aquatique du groupe des copépodes. ■

ET AUSSI

Mardi 6 mars, 18 h

Espace Culture,
Villeneuve-d'Ascq
<https://culture.univ-lille1.fr>

ÉVOLUTION DES FORMES DU VIVANT

D'où vient l'incroyable diversité de formes que présentent les organismes vivants? Réponses avec Virginie Courtier, chercheuse du CNRS à l'institut Jacques Monod.

Mardi 6 mars, 20 h 30

Espace des sciences,
Rennes
www.espace-sciences.org

LES HORLOGES DU VIVANT

Des horloges internes à nos organes régulent nos cycles physiologiques. Plusieurs facteurs peuvent perturber ces horloges et donc la santé. Revue avec André Klarsfeld, professeur de physiologie à l'ESPCI ParisTech.

Jeudi 15 mars, 18 h

La Turbine sciences,
Annecy
Tél. 04 79 75 91 20

L'EMPATHIE

Une conférence d'Arnaud Carré, enseignant-chercheur à l'université Savoie Mont-Blanc, sur cette précieuse capacité à se mettre à la place d'autrui.

Mercredi 14 mars, 18 h 30

BnF – Paris
www.bnf.fr

FACTORISATION DES NOMBRES

Daniel Perrin, de l'université Paris-Sud, évoque les lettres écrites en 1643 par Fermat à Mersenne sur la factorisation des grands nombres. Il poursuit jusqu'aux techniques utilisées aujourd'hui pour réaliser cette tâche et en explique les enjeux.

Mardi 27 mars, 17 h

Acad. des sciences, Paris
www.academie-sciences.fr

PHYSIQUE QUANTIQUE ET RÉFUGIÉS EN 1938

Histoire de science et de société avec le physicien Sébastien Balibar, qui racontera comment, en 1938, des savants réfugiés à Paris vont y rendre la physique quantique « visible à l'œil nu ».

MONTBÉLIARD

DU 19 MARS AU 9 SEPTEMBRE 2018
Le Pavillon des sciences
www.pavillon-sciences.com

Roulez mécaniques!



A force de se focaliser sur des mondes virtuels et électro-niques, on finit par ne plus remarquer les dispositifs mécaniques inventés pour réduire nos efforts physiques ou pour transformer un mouvement en un autre. Et pourtant, ces systèmes simples, mais ingénieux, sont omniprésents dans notre quotidien et rendent de précieux services.

Comment fonctionne une poulie palan? Quel est l'intérêt d'un levier? À quoi servent les courroies et les chaînes? Que font les engrenages, les comes, bielles ou manivelles? Les visiteurs trouveront des réponses à ces questions et bien plus. Ils comprendront par exemple qu'on diminue l'effort en réduisant non pas le travail mécanique à fournir, mais la force investie, qui travaille alors sur une distance plus longue pour produire la même énergie. Ils pourront découvrir le fonctionnement de ces systèmes mécaniques grâce à 20 manipulations interactives, tandis que des vitrines leur présenteront des objets du quotidien où ces mécanismes sont à l'œuvre. ■

TOULOUSE

JUSQU'AU 2 SEPTEMBRE 2018
Quai des Savoires
www.quaidesavoires.fr



#Humain Demain

Cette exposition propose au public de se glisser dans la peau d'un investisseur qui découvre les innovations scientifiques et techniques touchant aux domaines du corps et de la santé, et qui choisit celles qui lui semblent les plus prometteuses. Réparer le corps, l'augmenter par exemple en décuplant sa force grâce à un exosquelette, reprogrammer son ADN...: des recherches et développements en cours, qui soulèvent aussi des questions éthiques. ■

SORTIES DE TERRAIN

Samedi 3 mars, 8 h 30
Migné (Indre)
parc-naturel-brenne.fr
Tél. 02 54 28 12 13

DOMAINE DU PLESSIS

Comme les autres sites protégés de la Brenne, le domaine du Plessis est riche en oiseaux qui migrent ou qui hivernent. Observations avec un guide de la Fédération des chasseurs.

Dimanche 4 mars, 14 h
Senthem (68)
www.geologie-alsace.fr

VALLÉE DE LA DOLLER

Balade de 3 h 30 - 4 h sur un sentier de 5-6 km qui retrace 340 millions d'années d'histoire géologique de la région, avec visite de la Maison de la géologie et de la grotte du Wolfloch.

Jeudi 8 mars, 10 h
Mézières-en-Brenne (Indre)
parc-naturel-brenne.fr
Tél. 02 54 28 12 13

PLANTES ET VANNERIE SAUVAGE

Promenade à la journée entre lande et forêt, avec cueillette de plantes qui serviront à une initiation aux techniques de la vannerie.

Dimanche 11 mars, 14 h
Étréchy (Essonne)
www.essonne.fr
Tél. 01 60 91 97 34

VALLÉE DE LA JUINE

Une après-midi de promenade tout public dans une région au riche patrimoine naturel, géologique et historique.

Samedi 24 mars, 9 h
Saint-André-le-Gaz (38)
www.frapna-38.org
Tél. 04 76 91 34 33

MARAIS DU GUÂ

Une excursion dans une riche zone marécageuse pour y découvrir ses amphibiens et ses oiseaux.

Vendredi 30 mars, 9 h
Saint-Martin-de-Crau (13)
www.cen-paca.org
Tél. 04 90 47 02 01

PLANTES SAUVAGES DE LA CRAU

Une matinée d'initiation à la botanique du territoire de la réserve naturelle de la Crau, entre milieux secs et milieux plus verts.

PARIS

JUSQU'AU 28 MAI 2018
Musée de l'Homme
www.museedelhomme.fr

Mousses, sentinelles de la pollution



Méconnues du grand public, les mousses sont pourtant des plantes fascinantes, à la fois par leur place dans le monde végétal et par les usages que l'homme en fait, dont la détection de polluants. Une exposition gratuite qui accueille aussi, en écho, huit œuvres de l'artiste Émeric Chantier où se mêlent matériaux industriels et végétaux. ■

TREIGNES (BELGIQUE)

JUSQU'AU 15 AVRIL 2018
Musée du Malgré-Tout
<http://www.museedumalgreout.be>

Femmes préhistoriques



A quoi ressemblaient les femmes préhistoriques et quelles étaient leurs activités? Cette exposition tente de répondre à l'aide de comparaisons avec les chasseurs-cueilleurs actuels, de parures trouvées dans les sépultures, de représentations anciennes... Et confronte ces femmes disparues à celles créées par l'artiste Laure-Anne Delaey. ■



LA CHRONIQUE DE
GILLES DOWEK

POURQUOI LE MONDE EST IMPRÉDICTIBLE

Pour Pierre-Simon de Laplace, le manque d'information était l'obstacle à la prévision du futur. Les informaticiens ajoutent aussi le problème du temps de calcul.



Les lois de la physique classique sont déterministes, à l'image du mécanisme d'une montre. Mais ce déterminisme n'assure pas que l'évolution d'un système complexe soit prédictible.

Dans l'introduction de son *Essai philosophique sur les probabilités*, le savant français Pierre-Simon de Laplace énonçait la thèse du déterminisme, quelque peu abandonnée depuis, selon laquelle l'état du monde demain est entièrement déterminé par celui dans lequel il est aujourd'hui: «Une intelligence qui, pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la nature est animée et la situation respective des êtres qui la composent, si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule les mouvements des plus grands corps de l'univers et ceux du plus léger atome: rien ne serait incertain pour elle, et l'avenir comme le passé serait présent à ses yeux.»

Toutefois, pour Laplace, nous ne sommes pas de telles intelligences omniscientes. Le monde, bien que déterministe, est donc, pour nous, imprédictible, ce qui justifie l'emploi des probabilités: «La courbe décrite par une simple molécule d'air ou de vapeur est réglée de manière

aussi certaine que les orbites planétaires: il n'y a de différence entre elles que celle qu'y met notre ignorance. La probabilité est relative, en partie à cette ignorance, en partie à nos connaissances».

Il y a de nombreuses autres raisons qui rendent le monde imprédictible. L'une d'elles est liée à une question qui semble

Nos possibilités de calcul sont limitées par le fait que les ordinateurs sont soumis aux lois de la physique

peu préoccuper Laplace: où une telle intelligence «assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse» est-elle censée se trouver? Hors du monde? Ou, au contraire, comme nous et comme nos ordinateurs, à l'intérieur du monde lui-même? Si nous faisons l'hypothèse qu'elle est à l'intérieur du monde, il devient alors hardi de suppo-

ser qu'elle puisse calculer aujourd'hui l'état dans lequel le monde sera demain.

Imaginons une telle intelligence, par exemple un ordinateur, capable de prédire aujourd'hui l'état dans lequel le monde sera demain, et demain celui dans lequel il sera après-demain, etc., et qui présenterait chacune de ces prédictions sous la forme d'une image. Alors, comme cet ordinateur appartient au monde, il apparaîtrait lui-même sur l'image du monde de demain, et il y présenterait une image du monde d'après-demain. L'image du monde de demain contiendrait une image du monde de tous les jours suivants. Ainsi, prédire l'état dans lequel le monde sera demain demanderait de prédire aussi celui dans lequel il sera après-demain, après-après-demain, etc. Cela demanderait donc une quantité infinie de calculs, impossibles à effectuer en un temps fini.

Ainsi, nos possibilités de prédiction ne sont pas uniquement limitées par l'indéterminisme du monde ou par notre connaissance imparfaite de celui-ci, comme le supposait un certain idéalisme qui plaçait l'observateur à l'extérieur du monde, mais également par le fait que nous ne pouvons faire de prédictions que depuis l'intérieur du monde lui-même.

Ce constat que l'imprédictibilité est aussi liée aux limites du traitement de l'information illustre deux idées caractéristiques de la «pensée informatique», de la façon dont les informaticiens pensent. La première idée est que ce n'est pas uniquement l'existence d'un algorithme qui importe, mais aussi sa complexité, c'est-à-dire le temps que prend son exécution. Si un algorithme, par exemple, permet de prédire un séisme, mais que ce calcul prend plus de temps que celui qui nous sépare de cet événement, nous ne pouvons parler, au sens propre, de «pré»diction. La seconde idée est que les ordinateurs ne sont pas des abstractions hors du monde, mais des objets soumis aux lois de la physique, lesquelles contraignent, de ce fait, ce que nous pouvons calculer. ■

GILLES DOWEK est chercheur à l'Inria et membre du conseil scientifique de la Société informatique de France.

Tout ce que vous avez toujours voulu savoir sur la Préhistoire



En librairie
le 14 mars

Belin:
ÉDITEUR

Suivez-nous et abonnez-vous à notre newsletter
www.belin-editeur.com





LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

CAPTER   TOUT PRIX DU TEMPS DE CERVEAU

**Pour attirer l'attention dans un monde saturé
d'informations, certains sont prêts aux pires outrances.
Avec la complicité effective de leurs spectateurs.**



Se cimenter la tête
dans un four
  microondes
et passer à deux
doigts de la mort:
Jimmy Swingler
l'a fait pour rendre
populaire sa chaîne
de vidéos sur
Youtube.

La Flat Earth Society, ou «Société de la Terre plate», soufflera ses 62 bougies cette année et les thèses qu'elle défend semblent connaître un étonnant regain d'adhésion. Certains sont si convaincus que notre planète est un disque plat dont le centre est le pôle Nord qu'ils sont prêts à investir de l'argent et à risquer leur vie pour le démontrer.

Ainsi, Mike Hugues, membre de cette société et chauffeur de limousine de son métier, a décidé de monter à bord d'une fusée de sa propre conception afin de trancher définitivement la question. Définitivement: le terme est un peu ironique si l'on songe à ses chances d'en ressortir indemne.

De tous les commentaires qu'a suscités cette affaire tragicomique, celui avertissant que Mike Hugues risque d'être un futur lauréat des Darwin Awards fut sans doute le plus avis . Ce prix, inspiré par un humour très noir, récompense chaque année, assez souvent à titre posthume, un individu qui, par un acte stupide ayant conduit à sa mort ou à sa stérilisation, dispense l'humanité de la transmission de son code génétique.

Dans le même registre, une récente vidéo justifierait que son auteur, Jimmy Swingler, un youtubeur britannique de 22 ans, figure dans la catégorie «espoir» du prix. Sa drôle d'idée fut de se filmer après s'être ciment  la tête dans un four à microondes!

Le titre de la vidéo que Jimmy Swingler ne manqua pas de diffuser sur la toile: *Presque mort*. Le youtubeur n'a en effet dû

**Le youtubeur britannique
Jimmy Swingler
risque d'être un jour
lauréat des Darwin Awards**

sa survie qu'à l'intervention des pompiers, furieux par ailleurs d'avoir été mobilisés pendant près d'une heure pour le sauver. Le plus effrayant peut-être est que ce type de démarche n'est pas inspiré seulement par la bêtise. En effet, son auteur a pris soin d'accorder toutes sortes d'entretiens

en expliquant qu'il s'agissait pour lui de rendre TGFbro, sa chaîne Youtube, populaire (ce qui peut être très rémunérateur), en tentant de capter du temps de cerveau disponible. La meilleure solution lui a paru de mettre, une fois de plus (car c'est un récidiviste), sa vie en danger d'une façon stupide. Malheureusement, son raisonnement se tient puisque la vidéo a été vue des millions de fois.

D'ailleurs, souligne Jimmy Swingler, ceux qui contribuent au succès de ses films sont une des causes principales de ses prises de risque, et leur implication morale n'est donc pas nulle. Et en y réfléchissant, l'auteur de cette chronique, pas plus que tous les (nombreux) journalistes qui ont évoqué l'affaire ne peuvent être exonérés de leur responsabilité morale.

Sur ce marché saturé d'informations où l'offre et la demande sont intimement liées, ceux qui cherchent à capter du temps de cerveau disponible en jouant sur le fait que cet organe est sensible à toute proposition cognitive ne relevant pas de la routine pourront le faire en misant sur l'outrance, l'extrême stupidité, la peur et bien d'autres choses de cet ordre. Ici, la recette qui consiste à croiser des conséquences colossales (la mort) avec des motivations dérisoires (faire rire)   toutes les chances de susciter une épidémie d'attention un peu honteuse.

C'est sans doute avec ce sentiment ambigu, par exemple, que nous avons lu les articles concernant cette jeune  tats-unienne, Monalisa Perez, qui a voulu répondre à une question vitale: une épaisse encyclopédie peut-elle protéger d'une balle tirée par un pistolet? «Pas toujours», aurait pu répondre son petit ami Pedro Ruiz, qui n'a pas survécu à l'expérimentation. Le tout film  sur leur chaîne Youtube, bien entendu. La jeune fille a pla d  coupable d'homicide involontaire.

Cette triste histoire l'illustre une fois de plus: toutes les conditions sont réunies pour que les candidats aux Darwin Awards deviennent de plus en plus nombreux. ■

**GÉRALD BRONNER est professeur
de sociologie à l'université Paris-Diderot.**

La philosophie et la physique
sont-elles irréconciliables ?

ÉTIENNE
KLEIN

MATIÈRE

à contredire



Essai de
philo-physique

Dans l'**inter**êt de la science

mathieu
vidard

la tête au carré
14:05-15:00



**france
inter**venez
franceinter.fr

Bitcoin et blockchain

Comment les cryptomonnaies changent le monde

Le bitcoin, qui fait aujourd'hui tant parler de lui, n'était qu'un début. Cette cryptomonnaie s'accompagne d'un outil informatique, la blockchain, dont les applications potentielles vont bien au-delà des systèmes décentralisés de monnaie numérique. Registres distribués et infalsifiables, les blockchains permettent d'instaurer sans intermédiaire humain des relations de confiance parmi les membres d'un réseau. Elles pourraient abolir certains des défauts du système financier et économique, mais elles soulèvent aussi des questions dérangeantes. Sommes-nous prêts à vivre dans un monde où n'importe quel bien, qu'il s'agisse de monnaie ou de données personnelles, peut être échangé et suivi à la trace dans des livres de compte indélébiles ? Et si cette technologie, initialement destinée à réduire le pouvoir des banques et des États, leur permettait en définitive d'exercer un contrôle sans précédent sur les citoyens ?

L'ESSENTIEL

> Le bitcoin, créé en 2009, est une monnaie numérique échangeable de pair à pair, sans instance centralisée. Cette monnaie repose sur un outil informatique nommé blockchain, qui fait office de grand registre distribué et sécurisé.

> Depuis 2009, un grand nombre d'autres

« cryptomonnaies » fondées sur une blockchain sont apparues. Et les blockchains ont trouvé d'autres applications que les cryptomonnaies.

> Les cryptomonnaies et les blockchains sont en train de modifier le paysage économique et financier. Elles suscitent de nombreuses interrogations.

L'AUTEUR



JOHN PAVLUS
écrivain et cinéaste
en sciences, techniques
et design, vivant
à Portland,
aux États-Unis

Le nouveau monde des cryptomonnaies et des blockchains

Le bitcoin est la première grande monnaie numérique échangeable sans autorité centrale. De telles monnaies et les blockchains qui les rendent possibles modifient le paysage financier et économique. Comment, et jusqu'où ?

Bitcoin, cryptomonnaies, blockchains, contrats intelligents... Nombreux sont ceux qui ont entendu parler des évolutions rapides dans la technologie financière, mais rares sont ceux qui les comprennent vraiment. Des centaines de banques centrales et d'entreprises mûrissent une technologie qui change la donne: la blockchain, ou chaîne de blocs. Et les investisseurs parient des milliards dessus.

Pourtant, seuls 24% des professionnels des services financiers internationaux interrogés en 2017 par PricewaterhouseCoopers (PwC) la connaissent « extrêmement bien » ou « très bien ». La plupart des non-initiés ont des doutes sur sa légalité et n'ont aucune idée de son mécanisme. Certains spécialistes affirment que les blockchains ont le pouvoir de bouleverser des systèmes économiques entiers. D'autres mettent en garde contre le grand nombre d'idées fantaisistes qui circulent autour de cette technologie.

Tout a commencé avec le pseudonyme Satoshi Nakamoto, derrière lequel se cache aujourd'hui le milliardaire le plus secret de la planète (s'il est encore en vie). En octobre 2008, Nakamoto publia, par le biais d'une obscure liste de diffusion sur Internet, un article où il détaillait l'idée de la blockchain: une base de données

publique et distribuée, synchronisée toutes les 10 minutes sur des milliers d'ordinateurs, accessible à tous et néanmoins impossible à pirater par qui que ce soit. Son objectif? Fournir, pour un nouveau système de monnaie numérique que Nakamoto a nommé bitcoin et qu'il lança en 2009, un enregistrement des échanges qui soit décentralisé et à toute épreuve.

Jusque-là, le problème des monnaies échangeables de pair à pair était l'impossibilité de garantir qu'on ne pouvait pas les dépenser deux fois (*voir l'article d'Alexander Lipton et Alex Pentland, page 36*). La technique des blockchains a levé la difficulté en inscrivant chaque transfert de bitcoins dans un « registre distribué » qui, en vertu de lois mathématiques et cryptographiques, est inviolable.

Cette technique a rapidement débordé vers d'autres applications, d'où une frénésie d'innovations. On peut voir la blockchain comme une structure qui enregistre n'importe quelles données dont la provenance doit être sécurisée: historiques financiers, documents de propriété, preuves d'identité... Reste que cette technique peut aussi être exploitée à des fins malveillantes, et certains tentent de modérer l'enthousiasme qu'elle suscite. Voici une visite, en questions-réponses, du paysage dans lequel le bitcoin et sa blockchain nous ont projetés. ■

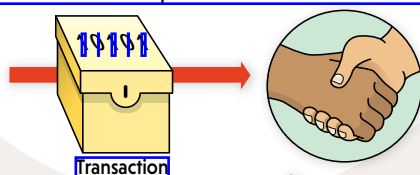
BIBLIOGRAPHIE

Pour plus de détails sur le fonctionnement du bitcoin et des blockchains, voir les articles de Jean-Paul Delahaye : **Bitcoin, la cryptomonnaie**, *Pour la Science* n° 434, décembre 2013 ; **Les preuves de travail**, *Pour la Science* n° 438, avril 2014 ; **Les blockchains, clefs d'un nouveau monde**, *Pour la Science* n° 449, mars 2015 ; **Du bitcoin à Ethereum : l'ordinateur-monde**, *Pour la Science* n° 469, novembre 2016 ; **La folie électrique du bitcoin**, *Pour la Science* n° 484, février 2018.

L. Leloup, Blockchain. La révolution de la confiance, Eyrolles, 2017.

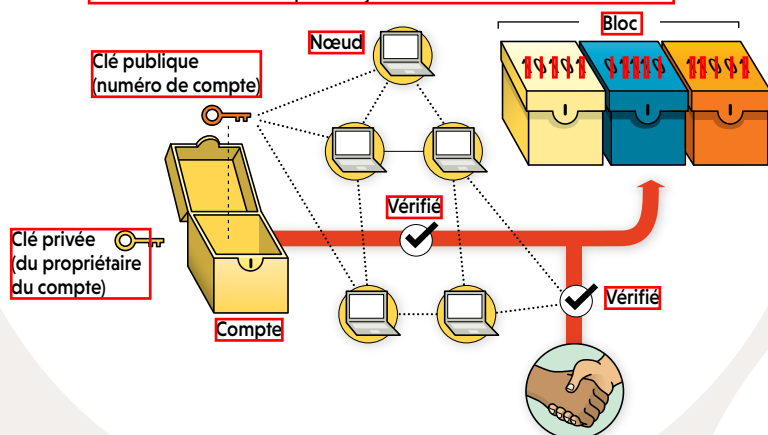
1

Une transaction à blockchain est lancée quand une partie envoie des données à une autre. Ces données peuvent être de toute nature : unités de monnaie (comme dans le cas du bitcoin) ou d'un autre instrument financier, contrats, actes notariés, titres de propriété, informations médicales, etc. L'objectif de la blockchain est de créer une trace permanente, vérifiable et infalsifiable de l'échange qui a eu lieu.



2

La transaction est diffusée pour vérification dans le réseau pair à pair d'ordinateurs qui gère la blockchain. Chaque nœud du réseau est équipé d'une procédure de vérification de la validité de la transaction (dans une transaction de bitcoins, par exemple, le réseau vérifie si ceux qui paient sont bien en possession du montant de bitcoins qu'ils prétendent détenir). Une fois la transaction vérifiée, elle est mise en attente. Elle est alors prête pour être associée à d'autres dans un bloc qui sera ajouté à la blockchain.

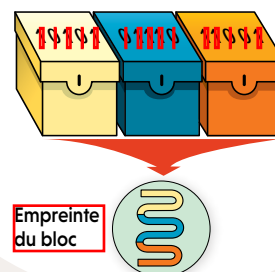


LE PRINCIPE D'UNE BLOCKCHAIN

Comment une monnaie numérique (ou une donnée de n'importe quelle autre nature) peut-elle s'échanger dans un réseau décentralisé constitué de nombreux inconnus qui n'ont aucune raison *a priori* de se faire confiance ? En créant un registre permanent de transactions qui ne peut être modifié par aucun membre du réseau. (Pour la définition de certains termes, voir le glossaire page suivante.)

3

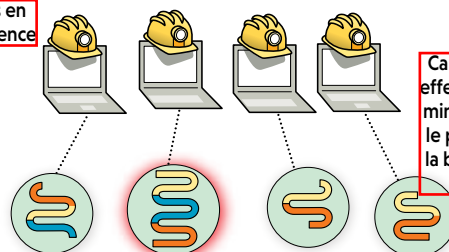
Chaque « mineur » du réseau choisit des transactions en attente pour composer un bloc qu'il cherche à ajouter à la chaîne des blocs précédents. Pour obtenir le droit d'ajouter ce bloc, il doit calculer, par une opération mathématique nommée hachage, une « empreinte » du bloc qui prend en compte l'empreinte des blocs précédents et qui vérifie une certaine propriété.



4

Les différents mineurs (faisant partie des nœuds du réseau) sont en concurrence pour gagner le droit d'ajouter à la chaîne de blocs le bloc choisi par chacun. Leurs ordinateurs effectuent de fastidieux calculs de hachage afin de produire une solution (l'empreinte du bloc) satisfaisant la propriété imposée (dans la blockchain du bitcoin, les mineurs cherchent des solutions, ou « valeurs de hachage », qui commencent par un nombre déterminé de zéros). Le mineur qui arrive le premier au bout de ce processus de « preuve de travail » en trouvant l'empreinte appropriée de son bloc « mine » celui-ci : il ajoute le bloc à la blockchain et gagne une récompense financière (de nouveaux bitcoins par exemple).

Mineurs en concurrence

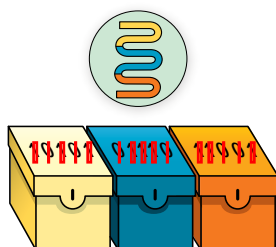


Calculs de hachage effectués par chaque mineur pour trouver le plus vite possible la bonne empreinte de son bloc

Obtention de la bonne empreinte de bloc

5

Le bloc validé est ajouté à la chaîne de blocs avec son empreinte numérique, qui code aussi mathématiquement les empreintes validées de tous les blocs précédents. Ces empreintes gigognes sécurisent de façon croissante la blockchain à chaque bloc qui s'ajoute. En effet, l'altération de ne serait-ce qu'un seul bit d'information à un endroit quelconque de la chaîne modifierait non seulement l'empreinte de ce bloc particulier, mais aussi celle de tous les blocs ultérieurs de la chaîne.



Le minage par preuve de travail étant très énergivore, certaines blockchains sont conçues de façon à fonctionner autrement. L'une des méthodes consiste à désigner au préalable des nœuds « validateurs », les seuls autorisés à enregistrer les transactions dans la blockchain.

GLOSSAIRE

CRYPTOMONNAIE

Forme de monnaie numérique reposant sur des méthodes cryptographiques afin de contrôler comment et quand sont créées les unités de monnaie, et de garantir le transfert sécurisé des fonds.

RÉSEAU PAIR À PAIR

Réseau d'ordinateurs reliés de façon décentralisée, tout ordinateur pouvant communiquer de proche en proche avec tout autre sans passer par un serveur central ou un administrateur.

NŒUD

Ordinateur participant à un réseau pair à pair. Le réseau du bitcoin comporte aujourd'hui plusieurs milliers de nœuds.

REGISTRE DISTRIBUÉ

Liste de transactions inscrites et horodatées qui est simultanément diffusée, copiée et vérifiée par tous les nœuds d'un réseau pair à pair. Si chaque nœud du réseau a une copie identique du registre, il est facile de repérer les entrées falsifiées ou les versions corrompues.

BLOC

Groupe de transactions enregistrées sur une blockchain. Dans le réseau du bitcoin, de nouveaux blocs sont ajoutés à la chaîne toutes les 10 minutes.

HACHAGE

Méthode cryptographique qui utilise une fonction mathématique (une « fonction de hachage ») pour condenser un ensemble quelconque de données en une chaîne unique de caractères alphanumériques de longueur fixe donnée, nommée valeur de hachage. Cela crée une empreinte numérique des données hachées facilement vérifiable : il suffit qu'un seul bit des données originales soit modifié ou corrompu pour que l'empreinte donnée par la fonction de hachage soit complètement différente. Le hachage est « à sens unique » : les données ne peuvent pas être reconstituées à partir de leur empreinte.

MINAGE

Ce terme désigne le processus par lequel les nœuds d'un réseau de cryptomonnaie rivalisent entre eux pour ajouter de façon sécurisée un nouveau bloc de transactions à une blockchain. Des unités de monnaie sont attribuées en récompense – une incitation financière à assurer la sécurité. Le minage implique de télécharger la dernière version en date des transactions de la blockchain pour vérification, puis d'effectuer des calculs systématiques pour rechercher la solution à une énigme mathématique compliquée, créée via le hachage du bloc. Le premier nœud qui trouve la bonne solution « mine » ce bloc : il l'ajoute à la chaîne de blocs et décroche la récompense associée. Plus un mineur dispose de puissance de calcul pour rechercher la solution, plus il a de chances de la trouver, un processus dit de validation par preuve de travail.

BITCOIN ET BLOCKCHAIN, EST-CE LA MÊME CHOSE ?

Non, mais ils sont régulièrement confondus parce qu'ils ont été portés ensemble à la connaissance du public en 2008, quand Satoshi Nakamoto a publié son article décrivant comment créer la monnaie bitcoin grâce à la technologie des blockchains qu'il inventait. Le bitcoin est un type de cryptomonnaie parmi d'autres. Quant à la blockchain, c'est la technique grâce à laquelle le système du bitcoin peut exister ; il s'agit d'une infrastructure que l'on peut utiliser pour assurer le suivi de nombreux types de transactions. La technique des blockchains existe sans le bitcoin, mais l'inverse n'est pas vrai.

D'OÙ VIENT LA VALEUR D'UNE CRYPTOMONNAIE ?

Selon certains experts, une cryptomonnaie telle que le bitcoin a de la valeur en vertu de sa sécurité (la blockchain du bitcoin n'a jamais été piratée jusqu'à présent) ou de sa rareté imposée (17 millions de bitcoins sont en circulation à ce jour ; le nombre total de bitcoins émis a été limité à 21 millions, ce qui signifie que le bitcoin ne pourra jamais être dévalué en « faisant tourner la planche à billets »). D'autres affirment que la cryptomonnaie a une valeur intrinsèque, le minage étant un travail fastidieux qui renforce le réseau ; en d'autres termes, c'est l'effort qui confère de la valeur. Mais cela ne s'applique pas à une cryptomonnaie ne faisant pas appel au minage. Selon Christian Catalini, du MIT, « sa valeur découle du consensus. Nous sommes tous d'accord qu'elle a de la valeur ». La monnaie est un moyen social d'assurer le suivi des échanges et des dettes ; si les cryptomonnaies se révèlent plus efficaces pour assurer ce suivi, leur valeur est assurée, qu'elles représentent un bien matériel ou juste un nombre.

LE BITCOIN, MONNAIE DE DEMAIN OU FEU DE PAILLE ?

Le bitcoin est la monnaie virtuelle la plus populaire, mais elle est aussi largement spéculative et très volatile : par exemple, le bitcoin a perdu 40 % en deux semaines en septembre 2017, avant de rebondir et d'atteindre des sommets à la fin de l'année, puis de chuter violemment au début de janvier 2018. Pour certains experts, les limites techniques du réseau (sa gestion des transactions est lente) combinées à des coûts de minage importants grèvent l'avenir de cette cryptomonnaie. « Nous ne parions pas sur le bitcoin », affirme Charlie Morris, directeur des placements chez Next-Block Global, entreprise qui investit dans la technologie des blockchains.

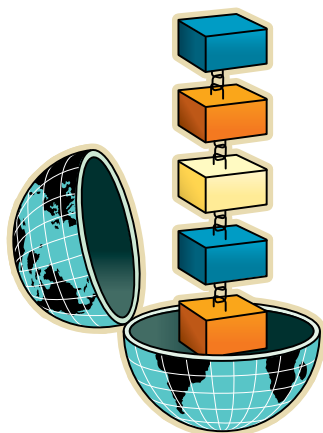
Ether, la deuxième plus grande monnaie virtuelle, a peut-être plus de ressorts pour durer. Ether n'est pas tant une monnaie analogue à des espèces qu'un « actif à blockchain », selon les mots de Charlie Morris, utilisé pour alimenter et sécuriser le réseau Ethereum. Un peu comme lors de la location de serveurs virtuels dans le cloud de Google, les développeurs souhaitant créer des applications à l'aide de la blockchain d'Ethereum doivent payer leur accès en unités monétaires appelées ethers. Plus Ethereum devient utile en tant que plateforme grand public, plus l'ether acquiert de valeur et de stabilité. De nouvelles plateformes et monnaies vont très probablement émerger – la course à la domination ne fait que commencer.

35 %

C'est la part approximative que représentent les bitcoins en termes de capitalisation, parmi l'ensemble des cryptomonnaies.

10 %

C'est la part du PIB mondial qui sera stockée dans des blockchains d'ici à 2025, d'après un rapport du Forum économique mondial datant de 2015.



VA-T-ON VERS LA FIN DES ESPÈCES ?

On pourrait avoir l'impression que les billets et les pièces de monnaie vont disparaître, mais, d'après les experts, on en est loin. On utilise encore beaucoup les espèces et le système actuel ne dysfonctionne pas au point qu'on veuille le défaire. Certes, le bitcoin et l'éther peuvent servir de valeurs ou d'unités d'échange, mais ils ne sont pas acceptés comme monnaie légale dans suffisamment d'endroits pour faire concurrence aux espèces.

Dans des pays tels que le Kenya, où peu de gens ont des comptes bancaires classiques et où des services financiers par téléphonie mobile tels que M-Pesa ont rendu les placements et les virements d'argent par téléphone beaucoup plus faciles que les échanges d'argent physique, les cryptomonnaies pourraient sembler tout adaptées. À condition que le minage se fasse ailleurs : il consomme beaucoup d'électricité, ressource peu disponible en Afrique, continent où les téléphones portables de base se vendent beaucoup mieux que les smartphones, et où les possesseurs d'ordinateurs personnels sont peu nombreux.

QUI SONT LES UTILISATEURS DE BLOCKCHAINS ?

Les blockchains ne servent pas qu'aux cyberlibertaires, et elles sont loin de ne concerner que la finance. Voici quelques exemples.

- **Institutions financières** : Des banques globales et organismes de placement travaillent sur des projets de blockchains, parfois en s'unissant au sein de consortiums. Depuis 2012, Ripple est un système prospère fondé sur une blockchain qui gère les transactions internationales entre banques. De jeunes pousses projettent de déployer des blockchains dans le domaine de l'évaluation du crédit ; elles espèrent ainsi mettre fin aux fuites de données, comme celle qu'a subie la société Equifax, victime d'un piratage.
- **Administrations** : Aux États-Unis, le Delaware et l'Illinois utilisent des registres distribués pour les certificats de naissance. Dubai a intégré les blockchains à plusieurs de ses services administratifs, comme l'obtention de licences. En 2016, la Tunisie a commencé à émettre une version numérique de sa devise nationale adossée à une blockchain et appelée eDinar.
- **Entreprises de technologie** : Le réseau Ethereum (conçu comme support de nouvelles applications, et non en tant que simple écosystème pour monnaie virtuelle comme le réseau Bitcoin) est comparable à un App Store pour les jeunes pousses des blockchains. Des centaines de projets et d'entreprises l'exploitent, telle la société WePower, une plateforme d'échanges d'énergies renouvelables entre particuliers.
- **Droits d'auteur et propriété intellectuelle** : La musicienne britannique Imogen Heap a lancé Mycelia, un incubateur technologique qui assure le suivi des métadonnées associées aux œuvres de création, supprimant les intermédiaires tels que iTunes.
- **Organismes d'assistance et à but non lucratif** : La BitGive Foundation encourage et responsabilise le don caritatif. Et le programme alimentaire mondial des Nations Unies rationalise la façon dont elle assure le suivi et la distribution de l'aide aux réfugiés syriens en Jordanie.
- **Institutions académiques** : Le projet Blockcerts vise à rendre tous les diplômes et certificats professionnels plus fiables et faciles à partager.
- **Gestionnaires de biens** : L'entreprise Everledger, basée à Londres, cible l'industrie du diamant en enregistrant les attributs et la provenance de chaque pierre précieuse.
- **Journalistes** : Pour contrer les fausses informations, Civil offre aux journalistes une plateforme pour créer un journalisme inaltérable, sans publicité, protégé contre les intérêts extérieurs (Russie, Facebook...) et soutenu par les lecteurs.
- **Gens ordinaires** : Pour les travailleurs migrants qui envoient de l'argent à leur famille restée au pays, l'utilisation de bitcoins coûte moins que les transferts par Western Union ; ainsi, environ 20 % des transferts d'argent entre la Corée du Sud et les Philippines se font maintenant par ce biais.

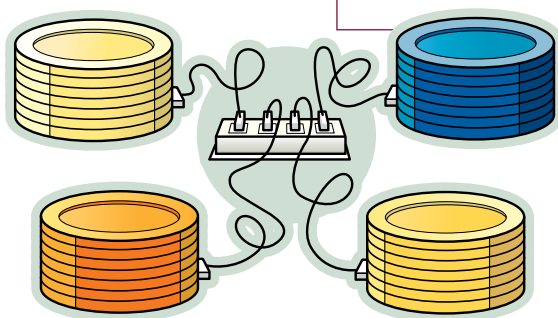
POURQUOI UTILISER UNE CRYPTOMONNAIE PLUTÔT QU'UNE DEVISE NATIONALE ?

Imaginez que vous déteniez un billet de 100 euros qui ne permette d'acheter que pour 50 euros de marchandise. Au Venezuela, où la monnaie officielle est en train de s'effondrer, ce scénario est une réalité. Chaque année, le revenu net d'un habitant y perd à peu près la moitié de sa valeur à cause de l'hyperinflation. Pour y remédier, certains achètent des bitcoins.

Comment en vient-on à préférer une cryptomonnaie difficile à comprendre, et dont la valeur n'est garantie par aucun État, à une matière première comme l'or, dont la valeur est reconnue depuis toujours ? D'abord, convertir des bolivars vénézuéliens en bitcoins est facile : quiconque a accès à Internet peut le faire. Ensuite, le bitcoin n'étant pas un objet matériel, il n'est pas besoin de le cacher dans un lieu peu sûr (comme un matelas ou, dans le cas du Venezuela, une banque). Et tandis que le bolivar a chuté brutalement, le cours du bitcoin a pour le moment une tendance moyenne à la hausse. Dans un pays où l'on attend une inflation dépassant 2 300 % en 2018 (d'après le Fonds monétaire international), la prise de risque paraît raisonnable.

LA BLOCKCHAIN EST-ELLE UNE NOUVELLE SORTE D'INTERNET?

Non. La blockchain elle-même a besoin d'Internet pour déployer et maintenir son réseau pair à pair. Il convient aussi de noter que quand les gens parlent de « la » blockchain, sans plus de précisions, ils font presque toujours référence au système particulier que Satoshi Nakamoto a mis en place pour déployer le bitcoin. La blockchain du bitcoin a été le premier système de registre distribué ne faisant pas appel à un serveur centralisé ou une organisation pour son déploiement. Elle reste l'une des plus importantes : en janvier 2018, elle contenait plus de 154 gigaoctets (154 milliards d'octets) d'information, et chaque nouvelle transaction en augmente la taille. Mais cela reste très inférieur à la quantité de données présentes sur Internet, qui serait de l'ordre du yottaoctet (10^{24} octets, soit une différence de 13 ordres de grandeur).



1 500

C'est le nombre approximatif de cryptomonnaies en circulation à la fin de janvier 2018.

OÙ LE MINAGE SE FAIT-IL?

70 %

environ des bitcoins sont minés en Chine, le deuxième pays le plus actif est l'Inde, avec 4 %. N'essayez pas de miner seul chez vous. La tâche est aujourd'hui dominée par de gigantesques fermes de minage, et les chances qu'un particulier mine des bitcoins sont extrêmement faibles. Il dépenserait beaucoup plus en factures d'électricité qu'il ne pourrait espérer gagner en profits.

QUELLES SONT LES FUTURES APPLICATIONS POSSIBLES DES BLOCKCHAINS ?

En voici quelques exemples.

- **Des voitures autonomes en autogestion** : Au lieu de rouler pour Uber, votre voiture se conduirait toute seule pendant que vous travaillez ou que vous dormez. Des contrats intelligents garantis par des blockchains pourraient faire disparaître les intermédiaires comme Uber et Blablacar de l'équation du covoiturage en automatisant leurs deux fonctions de base : la mise en relation des chauffeurs et des passagers, et la facilitation des paiements.
- **Des données médicales portables** : La technique qui permet à deux personnes d'échanger des bitcoins sans nécessairement se faire confiance pourrait également garantir l'information médicale, dont le contrôle serait entièrement entre les mains du patient. C'est ce qu'explique Brian Behlendorf, directeur exécutif du projet Hyperledger de la Fondation Linux, une trousse à outils pour construire des applications à blockchains. Les patients se verraient attribuer un « portefeuille santé » où figurent leurs données et leurs antécédents. Un médecin pourrait accéder à un registre et demander votre groupe sanguin, émettant une demande d'accès sur le téléphone de l'utilisateur. « Vous aurez ainsi un historique des personnes avec qui vous avez partagé les données, et la possibilité d'effacer l'information communiquée une fois terminé le traitement », indique Brian Behlendorf.
- **Un superordinateur global** : Vous pourriez participer à un superordinateur décentralisé mondial en reliant vos appareils à des milliers d'autres dans un réseau pair à pair, une blockchain permettant de vous rémunérer pour cela. Pendant que vous dormez, votre ordinateur portable et votre tablette pourraient être loués par des scientifiques souhaitant faire tourner des simulations, par exemple. Un projet nommé Golem y travaille déjà. La puissance cumulée des ordinateurs portables inactifs, très supérieure à la puissance des centres de données, accélérerait considérablement les calculs dans des domaines tels que la modélisation du climat.

QUELLES SONT LES LIMITES ET LES DANGERS DES BLOCKCHAINS ?

Emin Gün Sirer, chercheur à l'université Cornell spécialisé dans les blockchains, explique que ces dernières constituent un support quasiment impossible à modifier après coup. Mais il prévient : « Cela ne signifie pas que tout ce qui est inscrit sur une blockchain est vrai ou souhaitable. Si je suis piraté et que quelqu'un me vole mes cryptopièces et essaie de les utiliser, j'aurai très envie d'annuler cette transaction. Et c'est là que l'immuabilité devient un inconvénient. »

Il est également facile de confondre l'immuabilité théorique de la blockchain avec la sécurité réelle des données : les blockchains publiques telles que Bitcoin et Ethereum ne chiffrent en fait aucune information. Brian Behlendorf, de la Fondation Linux, va même plus loin : « Le registre ne devrait jamais être utilisé pour stocker des données personnelles ou quoi que ce soit de sensible, pas même sous forme chiffrée, dit-il, parce que quoi que nous chiffrions aujourd'hui, nous serons probablement en mesure de le déchiffrer dans quarante ou cinquante ans » avec les progrès de la technologie.

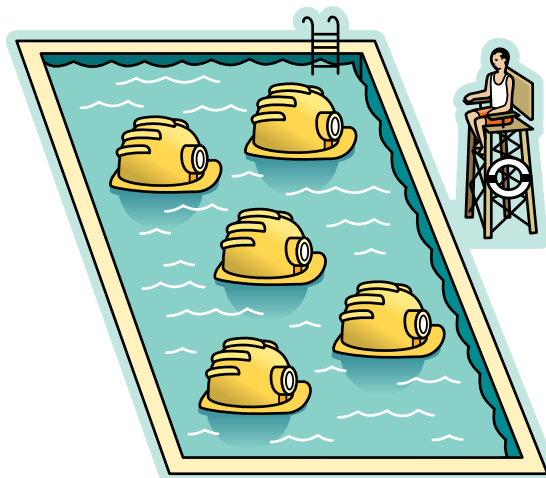
Certains partisans présentent les blockchains comme une panacée pour tout problème social où la confiance est un facteur important, mais c'est être aveuglément optimiste que de le croire (voir l'article de Natalie Smolenski, page 44).

QUELLE ÉNERGIE LES CRYPTOMONNAIES NÉCESSITENT-ELLES ?

Ce n'est pas parce que les cryptomonnaies n'ont pas d'attributs matériels que les utiliser ne coûte rien. Le processus volontairement intensif de minage des nouveaux bitcoins (la façon dont les nouvelles transactions sont ajoutées au registre, et qui permet aux mineurs de gagner des bitcoins) impose à l'ensemble du réseau pair à pair une grande masse de calculs pour valider les transactions de la blockchain. Tout ce traitement consomme de l'énergie.

Combien d'énergie au juste ? Commençons par la quantité de calculs. Début 2018, le taux de hachage du réseau Bitcoin tournait autour de 21 milliards de milliards de calculs par seconde de la fonction de hachage notée SHA256. Tirer de ce chiffre une estimation précise de la consommation énergétique est impossible parce que le réseau étant décentralisé, on ne peut connaître la consommation des nœuds individuels. Mais des estimations fiables placent la consommation électrique annuelle du réseau Bitcoin aux alentours de 40 térawattheures, soit à peu près 10 % de celle de la France entière. Pour chaque transaction, le réseau consommerait en moyenne plus de 500 kilowattheures, d'après le site Digiconomics (1 kilowattheure est l'énergie consommée par un radiateur de 1 000 watts au bout de 1 heure de fonctionnement). Celui-ci estime l'empreinte carbone de la consommation du réseau Bitcoin à 23 millions de tonnes de dioxyde de carbone (l'équivalent de l'empreinte carbone d'un pays tel que la Tunisie).

Le créateur d'Ethereum, Vitalik Buterin, envisage de faire basculer la blockchain du réseau vers un mécanisme de validation différent nommé preuve d'enjeu, qui ne repose pas du tout sur le minage. Il est peu probable que le réseau Bitcoin, plus vaste et plus décentralisé, en fasse de même à courte échéance. Mais Vinay Gupta, qui a conçu la stratégie de Dubaï en matière de blockchain, pense que l'appât du gain, qui motive les mineurs à transformer les kilowatts en cryptomonnaie, finira bien par les pousser à innover pour résoudre ce problème d'extensibilité. Selon l'investisseur en capital-risque Charlie Morris, quand les cryptomonnaies à preuve d'enjeu feront leurs preuves sur les marchés, « le minage ne sera plus qu'une petite aberration de l'histoire ». « Les gens diront : "Vous vous rappelez quand nous faisions tous ça ? C'était franchement ridicule, non ?" »



LES BLOCKCHAINS SONT-ELLES LÉGALES ?

Oui. Mais leur nature décentralisée et leur association avec le bitcoin (qui a été utilisé dans des transactions illégales telles que des ventes d'armes et de drogue) ont contribué à donner aux blockchains une réputation d'activité hors-la-loi qu'elles ne méritent pas forcément. Les blockchains peuvent être utilisées à des fins très variées, bonnes ou mauvaises, tout comme Facebook, le courrier électronique ou toute autre technologie Internet.

77 %

des organismes ou entreprises du secteur financier dans le monde devraient adopter les blockchains d'ici à 2020, selon PwC.

QUE PENSE LE PUBLIC DES CRYPTOMONNAIES ET DES BLOCKCHAINS ?

62 %

des Américains pensent que les cryptomonnaies sont utilisées pour réaliser des achats illégaux, ou ne savent pas du tout qu'elles sont utilisées, d'après un sondage de YouGov réalisé en 2017.

59 %

des consommateurs du monde entier sondés en 2017 par HSBC affirment ne pas avoir entendu parler de la technologie de la blockchain ; 80 % de ceux qui ont entendu parler de la technologie ne comprennent pas de quoi il s'agit.

39 %

des cadres supérieurs des grandes entreprises américaines admettent qu'ils connaissent peu ou pas du tout la technologie de la blockchain, d'après un sondage réalisé en 2017 par le cabinet Deloitte.

À QUOI TIENNENT LA SÉCURITÉ ET LA FIABILITÉ DES CRYPTOMONNAIES ?

Les cryptomonnaies n'étant *in fine* que des logiciels, leur fiabilité provient de leur code source. N'importe qui peut créer une cryptomonnaie et lever des fonds en la vendant par l'intermédiaire d'une offre initiale d'unités de monnaie ; mais ce n'est pas un hasard si les deux cryptomonnaies les plus populaires, le bitcoin et l'ether, ont été développés par des spécialistes en informatique. Cela dit, même des monnaies reposant sur des systèmes techniques impressionnants peuvent être exposées au risque. L'« organisation autonome décentralisée » nommée The DAO, un fonds d'investissement en ethers utilisant le système Ethereum, et qui a levé plus de 100 millions de dollars en 2016, souffrait d'un bug grâce auquel des pirates ont subtilisé des ethers pour une valeur de 50 millions de dollars.

33 %

des conversions entre bitcoins et monnaies usuelles ont été piratées entre 2009 et 2015, selon un rapport de 2017 du département de la Sécurité intérieure des États-Unis.

COMMENT RÉGULER UN SYSTÈME DÉCENTRALISÉ ?

Étant donné la réputation sulfureuse des monnaies virtuelles décentralisées, on pourrait supposer qu'elles ont été créées pour supprimer la réglementation financière, ou au moins lui échapper. Mais ce n'est pas tout à fait exact. Le système du bitcoin est lui-même doté de nombreuses règles, après tout ; simplement, elles sont définies et implémentées par le code source (et l'activité collective de son réseau pair à pair) plutôt que par des États ou des institutions financières. « Toute l'innovation du système Bitcoin réside dans le fait qu'il évite une gestion humaine de la tenue de dossiers », dit Patrick Murck, juriste qui travaille sur la politique et la réglementation des blockchains à l'université Harvard. L'objectif déclaré d'Ethereum, soutenir le déploiement de contrats intelligents autonomes, est essentiellement un objectif de contrôle. Et une blockchain n'est rien d'autre qu'un système de règles dictant mathématiquement ce qui peut être fait ou non avec l'enregistrement des données dans une base.

Ce qui est toujours important avec la réglementation financière, qu'elle soit décentralisée ou non, c'est qui a le privilège de réguler, et comment. D'ailleurs, les États interviennent parfois pour réguler de l'extérieur l'usage des cryptomonnaies. Ainsi, en 2013, la Chine a interdit les cryptomonnaies dans son système bancaire, et en septembre dernier elle a bloqué l'accès aux bourses d'échange de cryptomonnaies (permettant par exemple d'acheter ou vendre des bitcoins contre des monnaies nationales). Les États-Unis et le Japon sont en train d'intervenir pour réguler ce type de plateformes et les « offres initiales d'unités de compte » avec la même vigilance que celle qu'ils exercent dans le cadre des ventes d'actions et des activités de placements bancaires.

Une application future de la technologie des blockchains concerne la sécurisation des identités numériques. D'après l'investisseur en capital-risque Charlie Morris, il pourrait émerger de nouvelles cryptomonnaies qui réunissent identité numérique et information financière. Elles n'auraient pas l'anonymat du système Bitcoin (Charlie Morris estime que seuls quelques centaines de détenteurs de bitcoins paient honnêtement leurs impôts sur ces avoirs). Mais quand la monnaie numérique se généralisera, le compromis entre sécurité perçue et stabilité rendra peut-être la surveillance tolérable, voire souhaitable. Comme l'exprime Patrick Murck : « Si je vous confie un bien à garder en mon nom et avec lequel vous pouvez effectuer des transactions, qu'il s'agisse de bitcoins ou d'ours en peluche, alors vous êtes soit régulé, soit sur le point de l'être. »

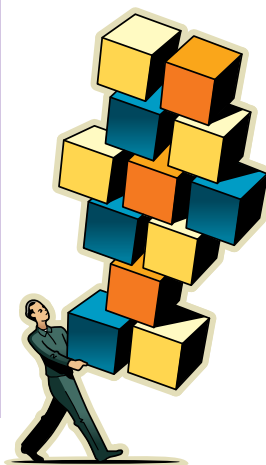
LES BLOCKCHAINS SONT-ELLES VULNÉRABLES ?

Jusqu'à présent, la blockchain du bitcoin, qui est la première, et à ce jour la plus vaste et la plus utilisée, n'a jamais été défaillante ou piratée. Mais cela ne signifie pas que toute blockchain est invulnérable par définition. « Il n'existe pas de technologie parfaite », prévient Emin Gün Sirer, de l'université Cornell, codirecteur de l'Initiative pour les cryptomonnaies et contrats. Voici trois points faibles que peut présenter une blockchain :

L'attaque des 51 %. La sécurité des réseaux de cryptomonnaie à base de blockchain repose sur deux ressources sans fond : la rapidité et l'appât du gain de leurs mineurs. Mais il est en théorie possible de vaincre ces deux obstacles. Pour subvertir le mécanisme de consensus de la blockchain, les pirates devraient prendre le contrôle d'une majorité (51 %) de la puissance du réseau. Ils pourraient alors, par exemple, bloquer la validation des transactions d'autres utilisateurs. Le réseau Bitcoin, avec ses milliers de nœuds, semble assez bien protégé contre une telle attaque. Mais des cryptomonnaies plus modestes sont exposées : l'une d'elles, Krypton, a ainsi été attaquée en 2016 par un groupe nommé 51crew. Même les blockchains ne faisant pas appel au procédé du minage sont vulnérables parce qu'elles reposent encore sur « l'hypothèse qu'une majorité de nœuds de leur réseau sont bienveillants », prévient Emin Gün Sirer.

La bonne vieille erreur humaine. Pour affecter la blockchain elle-même, il faudrait certes déplacer des montagnes (ou l'équivalent informatique). Mais le reste est vulnérable. En 2014, Mt. Gox, une plateforme d'échange entre devises classiques et bitcoins, a été victime d'une mauvaise gestion et d'un code défectueux ; elle a ainsi perdu 850 000 bitcoins (valant 620 millions de dollars à l'époque). Par ailleurs, si votre portefeuille numérique est rempli de cryptomonnaie et que vous perdez votre mot de passe, cet argent est presque certainement perdu. Comble de l'ironie, certains utilisateurs de cryptomonnaies gardent une copie de leurs codes confidentiels dans un coffre bancaire...

L'engorgement. Comme chaque nouveau bloc ajouté à une blockchain invalide tous les blocs précédents, chaque nœud effectuant la validation a besoin d'une copie de la dernière version en date de la chaîne entière. Avec déjà plus de 150 gigaoctets, la blockchain du bitcoin devient difficile à manipuler. Le registre d'Ethereum, conçu pour être plus flexible (afin de gérer des transactions plus complexes, telles que des contrats intelligents), est déjà plus gros que celui du bitcoin. Si tout le monde se mettait à l'utiliser, les superordinateurs à haute performance seraient-ils les seuls à pouvoir gérer la charge de données ? Il en résulterait une recentralisation du réseau, contraire à l'objectif des registres distribués !



ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE**



FORMULE
PASSION
-27%



FORMULE
DÉCOUVERTE
-25%

FORMULE
INTÉGRALE
-41%



99€
Au lieu de 168,45€*



79€
Au lieu de 108,45€*



59€
Au lieu de 78,45€*

BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** POUR 1 AN, JE CHOISIS MA FORMULE CI-DESSOUS :

☐ FORMULE **INTÉGRALE**
12 n° de Pour la Science + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

1A99€

☐ FORMULE **PASSION**
12 n° de Pour la Science
+ 4 Hors-Séries

1A79€

☐ FORMULE **DÉCOUVERTE**
12 n° de Pour la Science

1A59€

J'INDIQUE MES COORDONNÉES

☐ M. ☐ Mme

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal

Ville :

Téléphone

• Mon e-mail : (à remplir en majuscule)

@

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

• Je choisis mon mode de règlement :

☐ Par chèque à l'ordre de Pour la Science

☐ Par carte bancaire

N°

Date d'expiration :

Clé (Les 3 chiffres au dos de votre (B) :

Signature obligatoire

* Par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 30/06/2018 en France métropolitaine uniquement. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Photos non contractuelles.

L'ESSENTIEL

> Augmenter la transparence du système financier moderne réduirait les risques qui lui sont associés, mais cela suppose de modéliser le circuit monétaire à un niveau de détail qui dépasse les capacités techniques actuelles.

> Avec les cryptomonnaies, il est désormais possible de mémoriser et analyser tous

les échanges ou transactions. Ces outils permettraient d'élaborer des réseaux financiers plus efficaces et de décentraliser le contrôle de l'argent.

> Bien conçus et utilisés, ces réseaux numériques favoriseraient l'équité et la responsabilité. Mais ils pourraient tout aussi bien servir à un contrôle centralisé extrême.

LES AUTEURS



ALEXANDER LIPTON
membre du groupe
MIT Connection Science
à l'institut de technologie
du Massachusetts (MIT),
aux États-Unis



ALEX « SANDY » PENTLAND
professeur au MIT
et directeur du groupe
MIT Connection Science

Faire sauter la banque avec des cryptomonnaies

Les monnaies numériques fondées sur la technologie des blockchains ont un fonctionnement transparent. Elles préfigurent peut-être de nouveaux réseaux financiers qui mettront un terme à la concentration des richesses et qui stimuleront l'économie.

Par une belle journée de printemps, il y a plus de cinq mille ans, dans la cité mésopotamienne d'Ur, un commerçant étranger vendit sa marchandise en échange d'une bonne quantité de métal précieux, de l'argent. Il ne voulait pas ramener ce lot chez lui, sachant qu'il reviendrait à la fin de la saison des moissons acheter du grain. Il décida donc plutôt de se rendre au temple local, où étaient souvent conservés des objets de valeur, et demanda au prêtre de garder le lot d'argent pour lui.

Quelque temps après, le neveu du prêtre se présenta chez son oncle pour solliciter un prêt. Il souhaitait acheter des semences pour avoir ses propres récoltes, souhait qui fit vibrer la corde sensible de l'oncle. Ce dernier prêta donc au jeune homme une partie de l'argent qu'on lui avait confié, faisant le raisonnement que si jamais son neveu ne parvenait pas à le rembourser avant que le commerçant étranger ne le lui réclame, il pourrait remplacer le métal manquant en puisant dans ses fonds propres ou emprunter

l'équivalent auprès de ses amis. En utilisant un contrat à long terme avec le commerçant pour financer un prêt à court terme à son neveu, le prêtre doublait le nombre de transactions commerciales effectuées avec le même montant. En d'autres termes, il avait inventé le système de « réserves fractionnaires » (ou de « couverture partielle »).

D'après des données archéologiques, nous savons que des scénarios de ce type se sont joués en Mésopotamie. Et cela a profondément changé l'environnement financier de deux façons : tout d'abord, en augmentant la productivité globale de l'économie – ainsi, le neveu était désormais en mesure de se payer des semences ; en second lieu, en introduisant le risque – puisque le neveu ne serait peut-être pas en mesure de rembourser l'argent à temps.

Quelques millénaires plus tard, dans l'Europe du XVII^e siècle, l'émergence de banques centrales adossées aux États a créé le lien entre de telles « doubles dépenses » et la perception de taxes. Le roi empruntait de l'argent aux marchands afin de financer ses guerres ou la construction de routes, et l'utilisait pour payer



les fabricants et fournisseurs d'armes, ainsi que ses troupes. Cet argent commençait à circuler et à engendrer de l'activité économique et des profits, et à chaque étape la quantité d'argent était doublée (ou plus). Généralement, le roi remboursait les prêts à l'aide des impôts levés sur les bénéfices. L'ensemble de ce processus constituait un prototype de circuit monétaire qui a marqué la naissance du système bancaire en vigueur aujourd'hui.

Très schématiquement, le circuit moderne fonctionne de la façon suivante. Tout d'abord, une entreprise emprunte de l'argent à des banques privées telles que JPMorgan Chase ou HSBC pour payer les salaires de ses employés et d'autres frais. C'est l'étape où la monnaie est créée. Puis les consommateurs achètent les biens produits par les entreprises ou déposent leurs liquidités sous forme d'économies à la banque. Enfin, ces entreprises utilisent les sommes qu'elles ont perçues pour rembourser les banques, et la boucle est bouclée. À ce stade, l'argent prêté au départ disparaît, mais les intérêts versés restent dans le système.

C'est ainsi que les banques privées peuvent stimuler les économies en créant de la monnaie *ex nihilo*. Leur capacité à procéder de la sorte est régulée en partie par les banques centrales, qui imposent des limites à la quantité de capital et de liquidités que les banques privées doivent toujours détenir pour financer leurs activités de prêt.

LE SYSTÈME MONÉTAIRE ACTUEL EST DEVENU TROP COMPLIQUÉ À GÉRER ET À RÉGULER

Si seulement tout était si simple! Le circuit monétaire introduit hélas des problèmes de société fondamentaux. Pour commencer, il se crée inévitablement une poignée de milliardaires qui contrôlent une vaste concentration de la richesse totale. Il est également affligeant de voir combien il est courant de créer de la monnaie par le crédit (par effet de levier) sans en comprendre suffisamment les risques ou s'en soucier. C'est ainsi que se produisent les krachs financiers, tel celui de 2008: quand les banques et les autorités politiques ont encouragé une demande insatiable d'emprunts, cette demande a été satisfaite par une augmentation notable de la masse monétaire créée, et une augmentation encore plus grande du risque.

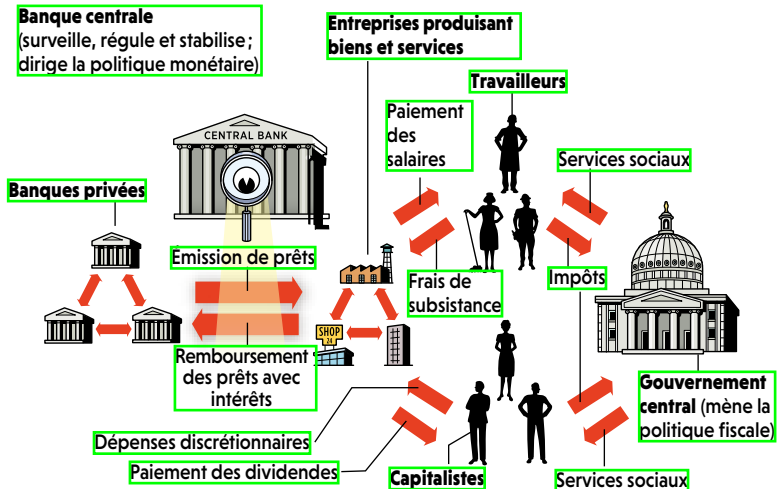
Il peut sembler évident d'imputer ces problèmes au circuit financier lui-même. Mais ce n'est pas le fond de la question. La création d'argent par effet de levier fonctionne bien tant que nous sommes capables de comprendre et de maîtriser ses risques inhérents tout en empêchant une concentration indésirable de richesses. Mais aujourd'hui, un écheveau de facteurs tels que l'explosion démographique, l'internationalisation du commerce et la

TROIS TYPES DE SYSTÈMES FINANCIERS

Le circuit monétaire actuel est devenu trop complexe pour être compris. Des technologies émergentes à « chaînes de blocs », ou blockchains, comme celle qui sert de base au bitcoin, décentralisent (et clarifient) le système. De nouveaux réseaux, tel celui du tradecoin, sont en cours de développement.

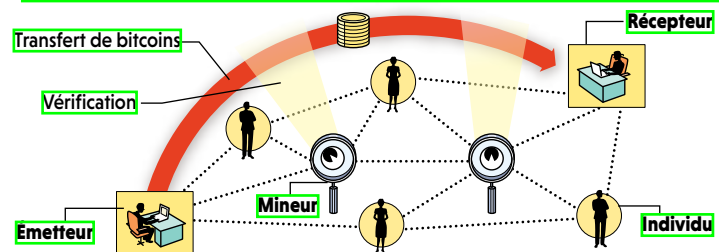
LE SYSTÈME DE RÉSERVES FRACTIONNAIRES (CIRCUIT MONÉTAIRE ACTUEL)

Les banques créent de la monnaie *ex nihilo* lorsqu'elles émettent des prêts aux entreprises. Les entreprises paient les salaires et les dividendes aux ménages. Les ménages achètent des biens et des services aux entreprises. Quand les prêts sont remboursés, la monnaie « créée » est détruite, mais les intérêts versés restent dans le système.



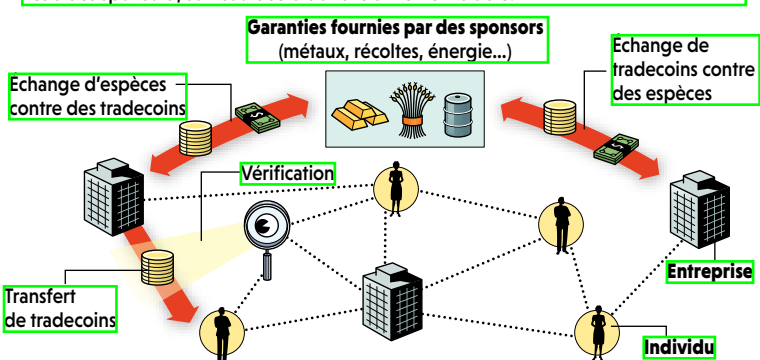
LE RÉSEAU PAIR À PAIR DU BITCOIN

Les transactions se font directement entre utilisateurs, sans l'aide d'intermédiaires désignés. Elles sont publiquement diffusées et enregistrées dans une blockchain. Le consensus est assuré par des « mineurs » qui gagnent des bitcoins s'ils enregistrent de nouveaux blocs. Le bitcoin n'a pas de valeur intrinsèque; son cours est donc par nature instable.



LE RÉSEAU PAIR À PAIR DU TRADECOIN

Comme avec le bitcoin, les transactions se feront directement entre utilisateurs et seront enregistrées publiquement dans une blockchain. Mais le consensus sera assuré par des validateurs désignés. La valeur du tradecoin sera couverte par des biens réels liés à des sponsors; son cours sera donc relativement stable.



puissance des ordinateurs rendent le système beaucoup trop compliqué à gérer et à réguler, et à plus forte raison à comprendre.

Le plus inquiétant dans cette affaire, c'est que le principal cadre que nous utilisons pour guider l'activité macroéconomique est fondé sur des paradigmes dépassés. Les modèles généralement utilisés pour régir la création de monnaie et les taux d'intérêt, par exemple, traitent encore les banques privées comme de simples intermédiaires, en ignorant le fait qu'elles constituent des protagonistes majeurs, qui créent activement de l'argent. Les banques ont leurs propres motivations, et leurs stratégies pour engranger des bénéfices introduisent dans le système une grande opacité. Il n'est guère étonnant que la crise des *subprimes* (prêts hypothécaires à risque) de 2008 ait été difficile à voir venir.

Il faudrait modéliser le très complexe circuit monétaire actuel avec un luxe de détails sans précédent pour que nous puissions le comprendre. Les limites technologiques ont longtemps rendu impossible une tâche aussi pharaonique. Mais avec la disponibilité de données massives ainsi que l'émergence des monnaies virtuelles et des contrats numériques, la situation est en train de changer. Plutôt que de s'appuyer sur des moyennes historiques pour estimer ce qui pourrait arriver à un système économique donné, il devient enfin possible de simuler la totalité des

d'une vaste industrie montante de technologies financières, caractérisée par le buzz et la spéculation. Ce qu'il est important de savoir, c'est que l'invention centrale est un «registre distribué», une base de données partagée et gérée par de multiples participants – une sorte de système informatisé et commun de comptabilité.

LES BLOCKCHAINS, TECHNOLOGIE FONDATRICE DES CRYPTOMONNAIES

Ce registre distribué constitue la technologie fondatrice qui a rendu possible l'avènement de cryptomonnaies – des monnaies cryptées numériquement – telles que le bitcoin. Sa structure de données sous-jacente, nommée blockchain, ou chaîne de blocs, consiste en une série de blocs enchaînés les uns à la suite des autres, chaque bloc regroupant un grand nombre de transactions sous forme de données numérisées. La chaîne est mise à jour de façon consensuelle par ajouts de nouveaux blocs au moyen de divers mécanismes de «preuve» faisant intervenir à la fois des humains et des ordinateurs (voir l'article de John Pavlus, page 28).

Conceptuellement parlant, les chaînes de blocs et les registres distribués ne sont pas nouveaux; par exemple, des enchaînements se produisent naturellement chaque fois que du pouvoir, des terres ou des biens changent de mains. Ce qui est nouveau, c'est l'association des deux concepts dans un système informatique infalsifiable qui peut être appliqué à un grand éventail de problèmes pratiques. Grâce aux nouvelles techniques de registres distribués fondés sur les blockchains, il est possible de créer des devises numériques beaucoup plus efficaces que le dollar américain ou l'euro, et même plus efficaces que le bitcoin.

Ces outils nous permettraient de suivre et d'analyser les transactions à un niveau suffisamment granulaire pour que nous puissions enfin comprendre le circuit monétaire. Avec un niveau de clarté sans précédent, nous pourrions apprendre à reconnaître de précoces signaux d'alerte se manifestant dans les milliers de milliards de transactions consignées dans le registre, et réagir de façon appropriée, ce qui augmenterait la stabilité et la sécurité du système.

Ce type de suivi à livre ouvert en temps réel serait également plus sûr pour l'ensemble de la communauté. Dans le krach de 2008, par exemple, la capacité administrative était insuffisante pour traiter les pertes individuelles de dizaines de millions de citoyens. En conséquence, les régulateurs se sont concentrés sur le sauvetage des grandes banques, relativement peu nombreuses, laissant les individus ordinaires payer le prix fort.

BIBLIOGRAPHIE

J. Barrdear et M. Kumhof, **The macroeconomics of central bank issued digital currencies**, document de travail n° 605, Banque d'Angleterre, juillet 2016.

A. Lipton, **Modern monetary circuit theory, stability of interconnected banking network, and balance sheet optimization for individual banks**, *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, vol. 19(6), article 1650034, 2016.

T. Hardjono et al. (éd.), **Trust : Data. A New Framework for Identity and Data Sharing**, Visionary Future, 2016.

A. Laurent et V. Monvoisin, **Les nouvelles monnaies numériques : au-delà de la dématérialisation**

échanges et transactions individuels et d'en analyser toutes les conséquences possibles. Cette perspective est en passe d'ébranler le fonctionnement et l'idéologie de la finance globale, et ses implications pourraient grandement améliorer la sécurité économique – ou la dégrader considérablement...

Il y a à peine une dizaine d'années, des techniques autorisant une réinvention de notre système financier sont apparues. Presque tout le monde a entendu parler du bitcoin, mais ce dernier n'est qu'un élément

À l'heure où cette technologie en évolution rapide commence à être exploitée pour des applications de plus en plus nombreuses et variées, la confusion règne dans de nombreux esprits. Comme le bitcoin est actuellement la forme de monnaie numérique la plus connue (en bien ou en mal, les avis sont partagés), il est utile de revenir un peu en arrière pour explorer ses origines et ses faiblesses, et comprendre en quoi elle diffère des versions plus prometteuses qui sont maintenant à l'étude.

La monnaie bitcoin a été conçue comme un système de paiement numérique pair à pair qui fonctionne sans autorité centrale. N'importe qui peut y adhérer, ce qui est à la fois une force et une faiblesse. Les utilisateurs effectuent entre eux des transactions financières directes (par exemple l'achat d'un bien), sans l'aide d'intermédiaires. Ces transactions sont inscrites dans un registre à blockchain distribué publiquement, que tous les participants peuvent (théoriquement) voir. Depuis la création du bitcoin en 2009, son cours a augmenté de plusieurs ordres de grandeur, ce qui en fait la coqueluche des spéculateurs.

Les promesses du système des bitcoins sont grandes. Ses partisans – essentiellement des idéalistes et libertaires férus de technologie, mais aussi certains criminels – s'attendent à ce que le bitcoin devienne une devise mondiale qui finira par supplanter les devises nationales, facilement manipulables selon eux. Certains enthousiastes voient même dans le bitcoin une version numérique de l'or, oubliant peut-être que l'or tient sa stabilité à la fois de ses attributs physiques et de ses milliards de détenteurs, et que dans le monde numérique les bonnes techniques sont régulièrement dépassées par de meilleures encore.

Le bitcoin n'est d'ailleurs pas la première monnaie virtuelle, et ce ne sera très probablement pas la dernière non plus à jouer dans la cour des grands. Elle souffre par ailleurs de sérieuses contraintes logistiques.

LE BITCOIN N'EST PAS LA PANACÉE

Par exemple, le nombre de transactions qui peuvent être traitées à chaque seconde tourne autour de 7, à comparer avec les 2000 que traite en moyenne le système Visa de cartes de paiement.

De plus, c'est un gouffre à énergie: le minage (le processus par lequel les membres du réseau de cryptomonnaie se font la compétition pour ajouter de nouveaux blocs de transactions à la blockchain, et ainsi gagner des bitcoins) consomme une énorme quantité d'électricité. Dans les pays où l'électricité coûte cher, les mineurs font rapidement faillite s'ils ne peuvent honorer les factures d'électricité des systèmes informatiques. On ne connaît pas



les chiffres exacts, mais on estime que le système des bitcoins consomme autant d'électricité qu'eBay, Facebook et Google réunis.

Le bitcoin a également été mis en place pour que l'autorité soit répartie entre de nombreux mineurs; or en se rassemblant pour former de gigantesques pools, un petit nombre de groupes sont devenus suffisamment puissants pour contrôler le système. Peut-on encore parler de pair à pair?

L'utilisation du bitcoin est de plus limitée. Le terme «monnaie» peut être défini par ses trois types d'utilisation: pour les transactions, comme réserve de valeur et en tant qu'unité de compte. Comme le cours du bitcoin par rapport aux monnaies légales, reconnues par les États, est extrêmement instable, il est difficile à utiliser au quotidien. Le bitcoin et l'ether, une autre grande cryptomonnaie, ne sont pas couverts par des biens réels ni même par des engagements gouvernementaux. Par conséquent, ils sont purement spéculatifs. En termes familiers, cela signifie que ces monnaies numériques ne sont pas de l'argent «véritable»: ce qui n'a pas de valeur ne peut avoir de prix. Certains enthousiastes du bitcoin présentent cette absence de valeur comme un avantage et affirment que, dans le futur, tout l'argent sera du même type que le bitcoin. Cela est hautement improbable, pour des raisons à la fois techniques et politiques.

Cependant, en tant que première monnaie virtuelle décentralisée prospère, le bitcoin

À PROPOS DES AUTEURS



ALEXANDER LIPTON a fondé une jeune entreprise, StrongHold Labs. Il a auparavant occupé plusieurs hautes fonctions à la Bank of America, et des postes de professeur invité à l'université d'Oxford et à l'Imperial College de Londres.



ALEX « SANDY » PENTLAND dirige le laboratoire Human Dynamics du MIT, et est notamment membre de l'Académie d'ingénierie des États-Unis. Son dernier ouvrage en date est *Social Physics* (Penguin Books, 2015).

UNE BRÈVE HISTOIRE DE LA MONNAIE

VII^e SIÈCLE AVANT NOTRE ÈRE

Les Lydiens et les Grecs introduisent les pièces de monnaie en métal.

XIV^e SIÈCLE

Les banques marchandes telles que celle des Médicis étendent leur activité à la finance internationale, au commerce et à l'industrie.

XVII^e SIÈCLE

En prêtant la valeur de l'argent déposé, les banquiers stimulent la productivité économique, mais créent aussi de nouvelles sources de risque qui produisent régulièrement des krachs locaux, voire de grandes dépressions. Les banques centrales, qui lient l'activité bancaire et l'impôt, apparaissent.

XVIII^e SIÈCLE

On adopte l'étalon-or, dérivé de systèmes antérieurs où la circulation de monnaie était contrôlée sans grande rigueur par une réserve de métaux précieux. Il en résulte une réduction du risque.

XX^e SIÈCLE

Avec les Accords de Bâle (à partir de 1988), l'étalon-or est remplacé : ces accords stipulent que détenir des biens faciles à vendre est aussi valable que de détenir de l'or.

représente une percée impressionnante. La technologie sous-jacente et la philosophie d'un système financier pair à pair non régulé par une autorité centrale sont innovantes.

Le bitcoin n'est bien sûr que l'une des applications des registres distribués fondés sur des chaînes de blocs. La blockchain, après tout, est une technique, et non une idéologie particulière : on ne devrait pas la confondre avec la philosophie qui anime le système du bitcoin ou avec les motivations de l'une quelconque de ses applications actuelles ou futures. Les blockchains ont certes le potentiel de résoudre certains des problèmes existants de notre système financier, mais on pourrait tout autant les utiliser pour les exacerber. Et quand on considère qu'un élément clé de la puissance est le contrôle de la monnaie (à la fois la masse monétaire existante et la future création de monnaie), on peut déjà avoir un petit aperçu de la boîte de Pandore de dangers moraux que cette technologie a ouverte.

Prenons les banques centrales des principales monnaies de réserve, telles que la Réserve fédérale des États-Unis et la Banque d'Angleterre. La confiance qu'on leur accorde est souvent liée à leur taille (plus c'est grand, plus c'est fiable), mais ces acteurs ont prouvé qu'un tel raisonnement est erroné. Ces banques centrales ont maintes fois pris le parti d'appauvrir les petites gens en diluant leurs obligations financières par le biais de l'inflation, la suppression des taux d'intérêts et autres politiques. Elles ont récemment testé des taux d'intérêt négatifs et envisagé des moyens de se débarrasser de l'argent liquide.

Plus alarmant encore, certaines banques centrales réfléchissent à la possibilité de rendre numériques toutes leurs monnaies et de consigner les achats directement dans un registre. Cela pourrait court-circuiter la contribution des banques privées et conférer aux gouvernements le contrôle absolu de l'économie. Cela signifie également que le gouvernement disposerait d'une trace de tout ce que vous achetez, y compris ce que vous achetez aujourd'hui en espèces précisément pour éviter de laisser une trace écrite.

Cette possibilité semble de moins en moins relever de la science-fiction, et des pays tels que la Chine, le Royaume-Uni, Singapour et la Suède ont annoncé des projets d'étude et éventuellement d'implémentation d'une telle stratégie. La conclusion de tout cela est que la technologie elle-même a beau être décentralisée par conception, on peut l'utiliser pour créer des systèmes à contrôle centralisé.

Il est clair que l'invention des chaînes de blocs et des registres distribués n'éradiquera pas les problèmes de krachs financiers ou d'inflation malsaine, du moins pas à court terme. Mais elle rend possible la création de

substituts légitimes aux grands et puissants acteurs. La technologie permet désormais de former des systèmes de monnaie globale spécialisés qui, auparavant, n'auraient pas joui d'une ampleur, d'une confiance ou d'une stabilité politique suffisantes pour se poser en concurrents. C'est pourquoi une prochaine étape naturelle serait que les petits acteurs, tels que des économies émergentes ou un grand nombre de citoyens, se groupent pour former des substituts aux banques centrales.

LE TRADECOIN, POUR UN SYSTÈME FINANCIER PLUS STABLE

En ayant cette possibilité à l'esprit, notre laboratoire au MIT (l'institut de technologie du Massachusetts) travaille à la création d'une monnaie numérique adaptée aux transactions à grande échelle. Dénommée tradecoin, cette monnaie sera enregistrée de manière indélébile dans une chaîne de blocs et adossée à tout instant à un panier de biens réels tels que des récoltes agricoles, de l'énergie ou des minéraux. Cela aidera à stabiliser sa valeur et à la rendre plus fiable aux yeux du public. L'idée centrale est que, pour que son utilité ne soit pas limitée, une monnaie doit à la fois inspirer confiance et reposer sur des systèmes de transaction efficaces.

Un tradecoin numérique et fondé sur un registre distribué permettrait à des alliances de petites nations, d'entreprises, de commerçants, d'associations coopératives d'épargne et de crédit, ou même de fermiers de rassembler suffisamment de biens pour garantir une grande monnaie liquide qui serait potentiellement aussi fiable et au moins aussi efficace que les devises nationales utilisées par la Banque mondiale et le Fonds monétaire international. Les membres de l'alliance Tradecoin seraient dans une certaine mesure protégés des politiques égoïstes adoptées par les gros acteurs. Grâce à la structure cryptographique du système, il serait pour eux plus facile, plus sûr et moins coûteux de se lancer dans le commerce international. Si les membres de l'alliance sont géographiquement et politiquement diversifiés, ils seront probablement mieux immunisés contre le risque de cessation de paiement que s'ils étaient couverts par une unique grosse entité. De fait, c'est exactement ainsi que la Banque d'Angleterre a fait ses débuts en 1694 : en tant qu'alliance de marchands.

Par conception, les principes sur lesquels reposent les monnaies telles que le tradecoin sont fondamentalement différents de ceux des cryptomonnaies telles que le bitcoin, qui ne sont pas garanties par des biens réels et ne font pas intervenir d'alliances. Le tradecoin >

permet également d'éviter le processus énergivore de minage en utilisant un réseau de nœuds « validateurs » variés et fiables, désignés au préalable. Les participants peuvent choisir un ensemble de nœuds de validateurs suffisamment divers pour que personne ne puisse soudoyer 51 % des validateurs en même temps. Le résultat est un instrument financier rapide, évolutif et respectueux de l'environnement. Il combine les techniques les plus récentes avec la vieille idée que la pièce d'or possède une valeur intrinsèque, grâce à laquelle elle est suffisamment fiable pour être utilisée loin de son lieu d'origine.

Les monnaies telles que le tradecoin seraient encore plus sûres que les monnaies d'aujourd'hui, car on peut les concevoir de façon à faire apparaître les détails du circuit monétaire, qui sera ainsi plus facile à surveiller. Un contrôle par des partenaires humains reste nécessaire, un peu comme l'Icann (Internet Corporation for Assigned Names and Numbers) contrôle Internet, ou comme des régulateurs tels que le Conseil de la Réserve fédérale supervisent le système bancaire aux États-Unis. De telles monnaies autorisent une comptabilité distribuée simple, ce qui signifie que l'on est capable de modéliser et prédire les risques avec une meilleure fiabilité.

Actuellement, ce type de transparence est impossible, les détails des transactions financières et des contrats étant très confidentiels. Mais si un tel système avait été en place en 2008, il aurait pu effectuer un suivi de la concentration extrême, chez certains opérateurs boursiers, d'obligations adossées à des créances hypothécaires, et on aurait pu simuler en détail les conséquences des changements de valeur de l'immobilier d'habitation. Au lieu de rester cachés, ces lots de crédits immobiliers toxiques auraient pu attirer l'attention comme autant de drapeaux rouges.

DES SYSTÈMES LOGICIELS POUR « RÉSEAUX DE CONFIANCE »

Nous nous sommes attaqués à ces défis concernant la transparence. Par exemple, nous construisons des systèmes logiciels de « réseau de confiance » que les États de l'Union européenne et des sociétés financières aux États-Unis utiliseront comme programme pilote. Ils permettront d'enregistrer et de « rejouer » les transactions et les contrats entre les différentes parties sans révéler les données propriétaires ou violer la confidentialité. Ces logiciels forment également le système au cœur du tradecoin. Nous explorons les façons de piloter deux monnaies tradecoin : l'une à destination du commerce international et garantie par une alliance de petits États, et l'autre garantie par des agriculteurs pour une utilisation sur les marchés des matières premières. Nous sommes

On entrevoit des monnaies numériques mondiales à l'abri des politiques égoïstes des banques centrales

en train de recruter des membres pour constituer l'alliance qui testera l'idée.

Il est passionnant d'entrevoir, pour la première fois dans l'histoire, la concrétisation de monnaies numériques mondiales qui soient en grande partie à l'abri des politiques égoïstes des riches banques centrales, lesquelles contrôlent jusqu'ici l'essentiel des masses monétaires. Et de fait, émergera probablement une vague de nouveaux systèmes dont quelques-uns pourraient, à terme, prendre suffisamment d'importance pour se hisser au même niveau que les plus grandes monnaies de réserve et leur faire concurrence.

Le fait que nous soyons aujourd'hui en mesure de créer des systèmes monétaires véritablement compréhensibles signifie que nous avons le potentiel de construire les outils pour minimiser les risques, éviter les krachs et protéger les libertés individuelles face aux gouvernements intrusifs et aux corporations trop puissantes. Et parce qu'elles seront garanties par (et convertibles en) des biens traditionnels, elles auront une valeur de référence réelle. Cela signifie qu'elles risqueront moins d'être la cible d'attaques spéculatives et qu'elles résisteront bien tant aux manipulations politiques qu'à l'inflation due aux problèmes particuliers de certains États.

Ensemble, les cryptomonnaies de la prochaine génération telles que le tradecoin pourraient réduire considérablement les frictions dans le commerce international, même dans le chaos du climat politique et économique actuel. En conséquence, les principales devises telles que le dollar américain pourraient perdre leur position de domination absolue, ou bien le système financier américain se verrait obligé d'améliorer son comportement. On espère ainsi que ces systèmes distribués, garantis par de vastes alliances d'acteurs variés, apporteront au monde davantage de transparence, de responsabilité et d'équité. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. Barrdear et M. Kumhof, **The macroeconomics of central bank issued digital currencies**, document de travail n° 605, Banque d'Angleterre, juillet 2016.

A. Lipton, **Modern monetary circuit theory, stability of interconnected banking network, and balance sheet optimization for individual banks**, *International Journal of Theoretical and Applied Finance*, vol. 19(6), article 1650034, 2016.

T. Hardjono et al. (éd.), **Trust : Data. A New Framework for Identity and Data Sharing**, Visionary Future, 2016.

A. Laurent et V. Monvoisin, **Les nouvelles monnaies numériques : au-delà de la dématérialisation de la monnaie et de la contestation des banques**, *Revue de la régulation*, vol. 18, pp. 1-24, 2015, (<http://journals.openedition.org/regulation/11524>).

ABONNEZ-VOUS À **POUR LA SCIENCE** EN TOUTE LIBERTÉ



FORMULE PASSION
-28%



FORMULE DÉCOUVERTE
-25%



FORMULE INTÉGRALE
-42%



BULLETIN D'ABONNEMENT

À renvoyer accompagné de votre règlement à : Pour la Science - Service abonnements - 19 rue de l'Industrie - BP 90 053 - 67 402 Illkirch cedex

☐ OUI, JE M'ABONNE À **POUR LA SCIENCE** EN PRÉLÈVEMENT AUTOMATIQUE, JE CHOISIS MA FORMULE ET JE COMPLÈTE L'AUTORISATION DE PRÉLÈVEMENT CI-DESSOUS.

☐ **FORMULE INTÉGRALE**
12 n° de Pour la Science + 4 Hors-Séries
+ Accès illimité aux archives en ligne depuis 1996

8,20€
Par mois
-42%
PV8E2U

☐ **FORMULE PASSION**
12 n° de Pour la Science
+ 4 Hors-Séries

6,50€
Par mois
-28%
PPV6E5U

☐ **FORMULE DÉCOUVERTE**
12 n° de Pour la Science

4,90€
Par mois
-25%
DPV4E5U

MES COORDONNÉES

Nom : _____
Prénom : _____
Adresse : _____

Code postal : _____

Ville : _____

Tél. Pour le suivi client (facultatif) : _____

E-mail obligatoire : _____ @ _____

J'accepte de recevoir les informations de Pour la Science ☐ OUI ☐ NON
et de ses partenaires ☐ OUI ☐ NON

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT SEPA

En signant ce mandat SEPA, j'autorise Pour la Science à transmettre des instructions à ma banque pour le prélèvement de mon abonnement dès réception de mon bulletin. Je bénéficie d'un droit de rétractation dans la limite de 8 semaines suivant le premier prélèvement. Plus d'informations auprès de mon établissement bancaire.

TYPE DE PAIEMENT : PAIEMENT RÉCURRENT

Titulaire du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Désignation du compte à débiter

BIC (Identification internationale de la banque) : _____

IBAN : _____

(Numéro d'identification international du compte bancaire)

Etablissement teneur du compte

Nom : _____

Adresse : _____

Code postal : _____ Ville : _____

Date et signature

Organisme Créancier : Pour la Science
170 bis, bd. du Montparnasse - 75014 Paris
N° ICS FR92ZZ426900
N° de référence unique de mandat (RUM)

Merci de joindre impérativement un RIB

Partie réservée au service abonnement. Ne rien inscrire

* Par mois et par rapport au prix de vente en kiosque, l'accès numérique aux archives. Délai de livraison : dans le mois suivant l'enregistrement de votre règlement. Offre réservée aux nouveaux abonnés, valable jusqu'au 30/06/2018 en France métropolitaine. Pour un abonnement à l'étranger, merci de consulter notre site www.pourlascience.fr. Conformément à la loi "Informatique et libertés" du 6 janvier 1978, vous disposez d'un droit d'accès et de rectification aux données vous concernant en adressant un courrier à Pour la Science. Votre abonnement en prélèvement est reconduit automatiquement et peut être interrompu par simple lettre. Photos non contractuelles.

L'ESSENTIEL

> Les banques et les États ont, à bien des égards, échoué à instaurer la confiance des citoyens dans l'économie globale.

> Avec la technologie de la blockchain, les relations de confiance sont établies via des machines et des algorithmes, et non via des intermédiaires humains tels que les banquiers.

> Grâce aux blockchains, on pourrait concevoir des systèmes qui rendent impossibles les abus ou escroqueries, plutôt que de les sanctionner après coup.

> L'utilisation à bon escient des blockchains dépendra *in fine* de la façon dont les logiciels géreront l'identité numérique et les données personnelles.

L'AUTEURE



NATALIE SMOLENSKI
anthropologue culturelle,
responsable de la stratégie
commerciale de l'entreprise
Learning Machine, basée
à New York

La blockchain, instrument de confiance?

La blockchain est un outil informatique qui instaure une confiance au sein du réseau qui l'utilise. Quel sera l'impact social ultime de cette technologie? Tout dépendra de la façon dont nos identités numériques et nos données personnelles seront gérées.

Pour participer à l'économie globale d'aujourd'hui, le commun des mortels doit accepter un marché asymétrique: sa vie est transparente pour les États, les banques et les grandes entreprises, alors que le comportement et les rouages des puissants acteurs de l'économie restent cachés. La frontière entre consommateur et citoyen s'est irrémédiablement brouillée.

Cette interaction à sens unique est ce que Shoshana Zuboff, chercheuse en sciences sociales à l'université Harvard, appelle le «capitalisme de surveillance», et il s'agit d'un problème structurel majeur. Les institutions dont la fonction même est d'instaurer des relations de confiance sociale, à savoir les banques et les États, ont, dans de nombreuses parties du monde, failli à cette mission, surtout au cours des trois dernières décennies.

Le krach financier de 2008 et ses conséquences ont donné lieu à une sorte de sentiment ambiant d'impuissance. Parmi les affaires qui ont été portées devant les tribunaux, la plupart ont été jugées en défaveur des petits actionnaires, sans que soient condamnés à des peines de prison les grands banquiers. Cela a achevé de convaincre de nombreux individus

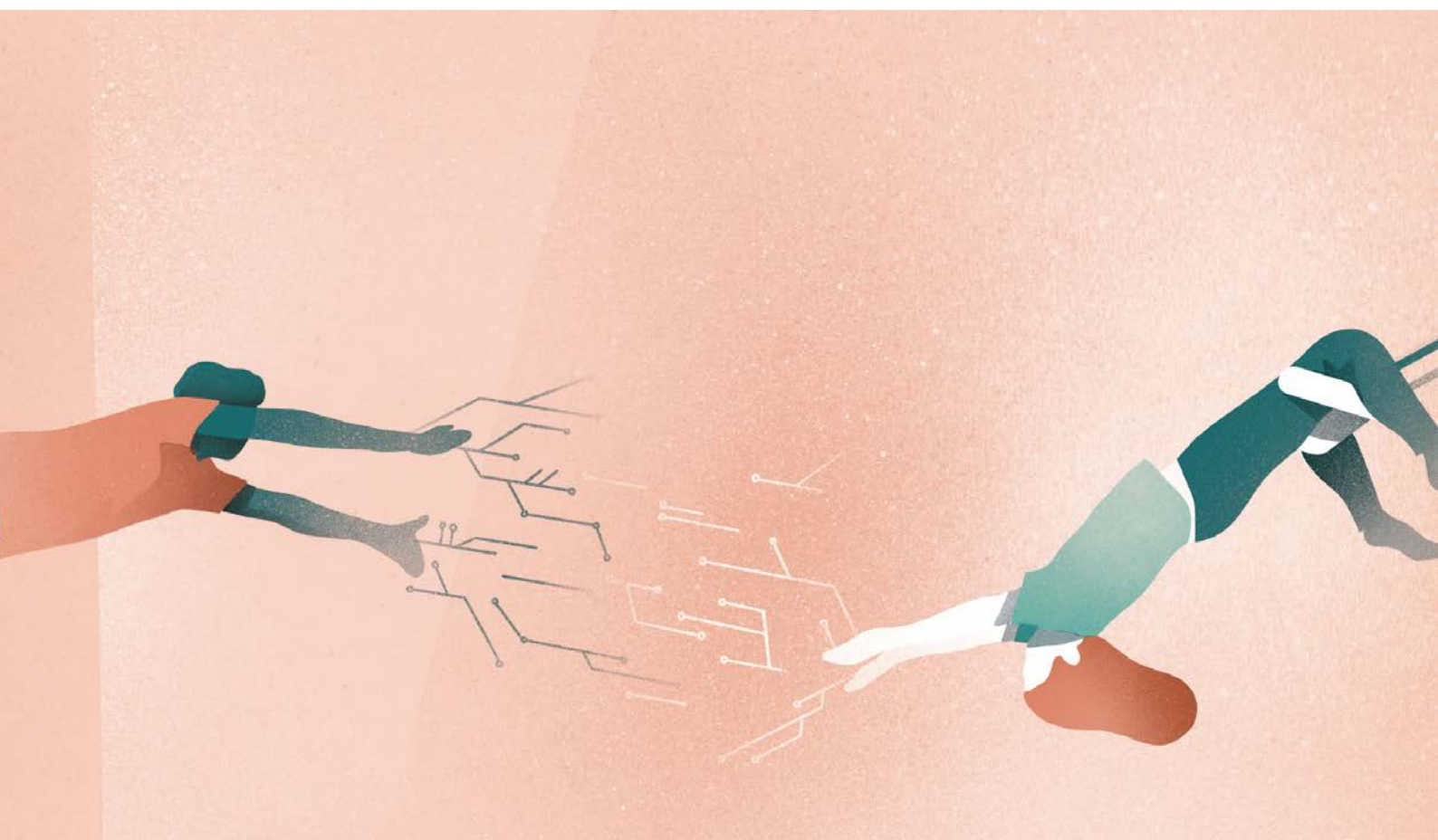
que les riches et les puissants s'associent pour défendre leurs propres intérêts.

Les problèmes vont bien au-delà des retombées liées aux emprunts toxiques. Une analyse d'une base de données de 2007 répertoriant 37 millions d'entreprises et d'investisseurs du monde entier a conclu que 40% de cet ensemble est contrôlé par 1% de ces acteurs, et que le gros de ce 1% est constitué par des institutions financières.

Au cours des trente dernières années, les revenus de placements sont devenus la première source de croissance économique dans la plupart des pays; ils dépassent de beaucoup la croissance des revenus et permettent à la frange la plus riche de s'enrichir toujours davantage. Dans le même temps, 2 milliards d'humains n'ont toujours pas de compte bancaire et sont exclus d'un tissu économique qui, même s'il est loin d'être parfait, est censé faciliter l'accès au capital.

Il n'existe pas de consensus sur la possibilité ou, *a fortiori*, la manière d'infléchir ces tendances pour promouvoir une plus grande inclusion et égalité économique sans nuire à la liberté individuelle. Cela nous amène à un moment historique où les formes d'autorité que sont le pouvoir et la richesse inspirent une méfiance accrue, sur fond d'une vie économique devenue inévitablement globale et mobile. S'il y a bien une tentative de





désengagement et de repli protestataire, il y a aussi la conscience qu'une telle réaction constituerait un autosabotage économique. Ces contraintes ont conduit des technologues du monde entier à imaginer des solutions de remplacement pour établir la confiance à plus grande échelle tout en la rendant plus intime et réciproque. Que la première monnaie numérique prospère, le bitcoin, soit entrée en scène en 2009 n'est pas une coïncidence: cette cryptomonnaie représente une réaction à ce désir croissant de transparence, d'accès et d'autonomisation.

Le bitcoin est une monnaie dont les transactions s'effectuent au moyen d'une blockchain, ou «chaîne de blocs»; il s'agit d'un réseau informatique décentralisé qui consigne dans un registre distribué toutes les transactions préalablement validées par un processus technique de consensus. Les blockchains révolutionnent les possibilités de gestion des échanges directs entre individus, échanges qui peuvent concerner non seulement des sommes d'argent, mais tout bien numérique.

On entend souvent dire que le bitcoin (et les chaînes de blocs en général) ne nécessite pas de confiance. Ce n'est pas tout à fait correct. Plus exactement, la confiance a été retirée aux acteurs humains et transférée à un système cryptographique, avec des incitations

matérielles (gain de bitcoins) à participer au système. En d'autres termes, la confiance est dépersonnalisée.

INSTAURER LA CONFIANCE EN LA DÉSHUMANISANT

De prime abord, cela peut sembler paradoxal. Toutes les formes de confiance ne reposent-elles pas, dans une certaine mesure, sur des humains? Tout au long de l'histoire humaine, la dynamique des migrations et du commerce a conduit à l'élargissement des réseaux de confiance, qui sont passés de petits groupes de personnes connues de tous à des communautés en grande partie constituées d'étrangers et d'adversaires. Pour s'implanter partout sur la planète, nourrir des populations croissantes, mener une guerre, construire des empires ou échanger des savoirs, les gens ont utilisé des techniques de la confiance qui se sont développées les unes à partir des autres, avec un certain recouvrement chronologique: la parenté et le don de cadeaux, la division du travail, la comptabilité (à l'origine du crédit et de la dette), la hiérarchie, la monnaie, les religions universelles et, plus récemment, la banque.

En ce début de ^{xxi} siècle, la confiance connaît une nouvelle étape de son évolution. Ces mêmes banques qui ont soutenu l'essor du

capitalisme moderne en jouant le rôle d'intermédiaires de confiance fiables sont, à bien des égards, devenues un obstacle à son développement. Dans notre système financier actuel, les politiques conduites et les lois visent à décourager les pratiques d'exploitation des individus au moyen de sanctions. À l'avenir, les blockchains pourraient tout simplement être conçues de façon à rendre impossibles ces pratiques.

LES BLOCKCHAINS, UN OUTIL D'ÉMANCIPATION... OU D'ASSERVISSEMENT !

Les règles de consensus du bitcoin, qui fixent les incitations et les exigences encadrant la participation à la blockchain, maintiennent très bien un système de gouvernance distribué, ouvert et pair à pair (voir l'article de John Pavlus, page 28). Ses transactions sont publiques, bien que pseudonymes; le code source du logiciel utilisé est ouvert et maintenu par un réseau global de développeurs bénévoles. De plus, la blockchain du bitcoin ne stocke pas les données d'identification; en guise d'adresses, elle utilise des paires de clés publiques-privées, plutôt que des comptes.

Mais les transactions fondées sur une blockchain sont plus facilement traçables que les transactions en espèces; cela signifie qu'une fois qu'une paire de clés est reliée à une identité connue, l'analyse de la blockchain peut, par exemple, aider la police à retrouver des criminels. Cette réalité va à l'encontre de l'idée répandue selon laquelle les cryptomonnaies conviendraient mieux aux activités criminelles que d'autres types de monnaie.

En fait, les cryptomonnaies réintroduisent le spectre du capitalisme de surveillance. Car les blockchains ont des propriétés qui se prêtent à la fois à l'émancipation humaine et à un degré sans précédent de surveillance et de contrôle. Seront-elles, au bout du compte, au service de notre liberté ou de notre soumission? Tout dépendra de la façon dont le système logiciel, à savoir le protocole de la blockchain et l'application qui lui est adossée, gère les identités numériques de ses utilisateurs.

En ce qui concerne le protocole lui-même, il est important de comprendre qu'il existe plusieurs façons de concevoir une blockchain. Généralement, le terme «blockchain» se réfère à un type de système où un registre de transactions universellement reconnu est répliqué (c'est-à-dire dupliqué et maintenu cohérent sur plusieurs serveurs), mais il n'y a pas d'unanimité sur un ensemble de caractéristiques qu'un tel système doit présenter. D'innombrables modèles de blockchains ont été introduits à ce jour, et ils sont conçus afin d'apporter des solutions à des problèmes différents.

Considérons par exemple Ethereum, une blockchain publique qui se présente comme un

ordinateur distribué global, nommé Ethereum Virtual Machine. Cette blockchain stocke des contrats intelligents qui sont exécutés quand les conditions qu'ils spécifient sont remplies. Son créateur, le Russo-Canadien Vitalik Buterin, envisage que, contrairement au système du bitcoin, les utilisateurs les plus investis dans le réseau (déterminés par des dépôts de garantie en cryptomonnaie) valideront collectivement les nouveaux blocs. Les utilisateurs qui ne respectent pas les règles se verront automatiquement confisquer leur cryptomonnaie.

Certaines blockchains sont conçues pour des communautés où règne entre les membres une grande confiance. Ces blockchains restreintes (*permissioned blockchains* en anglais) reposent généralement sur une autorité centrale qui accorde à des utilisateurs particuliers le rôle de lire ou déposer des transactions. Pour s'assurer que tous les membres de la blockchain se comportent bien, les blockchains restreintes tendent à se reposer sur une autorité centrale plutôt que sur des incitations matérielles automatiques comme dans le système du bitcoin.

Les cryptomonnaies réintroduisent le spectre du capitalisme de surveillance

Un exemple en vue est Ripple, une blockchain conçue pour servir de réseau de règlement lors des transactions interbancaires. De la même façon, l'organisation à but non lucratif EEA (Enterprise Ethereum Alliance) regroupe quelque 200 associés qui construisent une boîte à outils à code source ouvert censé permettre aux entreprises de concevoir leurs propres versions privées de la blockchain Ethereum.

D'autres initiatives similaires sont considérées comme de simples registres distribués, car il leur manque une ou plusieurs des propriétés sous-jacentes des blockchains. Ce sont généralement des registres à accès restreint, où beaucoup de transactions restent privées. L'un des plus importants outils de développement de blockchains privées est R3 Corda, élaboré par un consortium de banques afin de faciliter le consensus concernant les accords financiers.

BIBLIOGRAPHIE

Les nouveaux équilibres de la confiance, entre algorithmes et contrat social, *Cahier de veille de la fondation Mines-Télécom* n° 9, juin 2017 (téléchargeable sur www.imt.fr/cahier-de-veille-confiance-numerique/).

M. Casey et P. Vigna, **The Age of Cryptocurrency : How Bitcoin and Digital Money Are Challenging the Global Economic Order**, St. Martin's Press, 2015.

S. Zuboff, **Big Other : Surveillance capitalism and the prospects of an information civilization**, *Journal of Information Technology*, vol. 30(1), pp. 75-89, 2015.

D. Graeber, **Debt : The First 5,000 Years**, Melville House, 2014.

Les blockchains privées et les registres distribués ont vu le jour en partie pour inclure une forme de contrôle de l'identité des validateurs et de ceux qui effectuent des transactions (par conception, le protocole de la blockchain du bitcoin ne contient pas lui-même de mécanisme de vérification d'identité). L'identité est le terrain sur lequel se jouera le caractère émancipatoire ou oppressif, sur le plan social, des chaînes de blocs. Car plus il est facile de relier les transactions de quelqu'un à une identité (et plus l'identité numérique d'un individu devient centralisée et contrôlée de l'extérieur), plus les possibilités d'abus se multiplient.

DES APPLICATIONS À LA FOIS CONVIVIALES ET DÉPOURVUES DE CONTRÔLE CENTRALISÉ ?

L'individu lambda ne peut pas utiliser directement une blockchain, de la même façon qu'Internet ne peut pas être utilisé directement. En réalité, l'individu utilise des applications qui se servent de la blockchain sous-jacente d'une manière ou d'une autre. C'est dans cette couche d'applications que peuvent régner une grande confusion et, souvent, la mauvaise foi.

L'histoire du système bitcoin, par exemple, est jonchée d'échanges de cryptomonnaie et de fournisseurs de portefeuilles qui ont laissé des failles de sécurité béantes dans leurs applications, ce qui a donné lieu à des piratages retentissants et à des accusations de détournement de fonds.

Dans le cas du réseau Ethereum, des vulnérabilités ont permis le vol ou la perte de millions de dollars de sa cryptomonnaie, l'ether, les utilisateurs lésés n'ayant disposé de pratiquement aucun recours. En général, l'utilisation de n'importe quelle application développée par un tiers auquel on fait confiance pour conserver des biens numériques fondés sur une chaîne de blocs reste une démarche hautement risquée.

C'est là tout le problème insoluble des blockchains : le public ne les utilisera pas s'il ne dispose pas d'applications conviviales. Mais pour être conviviales, les applications recourent souvent à la centralisation, qui reproduit les conditions d'un contrôle centralisé que les blockchains visaient précisément à éviter.

Si l'on veut que les chaînes de blocs deviennent utiles à grande échelle, un certain lien entre l'identité et les transactions sera toutefois nécessaire. Peut-être cette identité n'exigera-t-elle pas de révéler complètement qui vous êtes. Comme l'ont affirmé certains membres de la communauté du bitcoin, la focalisation actuelle sur la vérification de l'identité est en grande partie injustifiée ; en général, ce que les gens veulent savoir, c'est si une affirmation particulière à votre propos est vraie :

avez-vous plus de 21 ans ? Avez-vous réellement obtenu un doctorat au MIT ? Êtes-vous citoyen américain ? Nous avons été habitués par les structures incitatives du capitalisme de surveillance à croire qu'il est nécessaire de livrer une multitude de données personnelles pour suivre notre chemin dans la vie de tous les jours. Changer ce présupposé est l'un des effets les plus radicaux que les techniques de chaînes de blocs pourraient avoir.

Imaginez, par exemple, l'avenir du vote électronique. Une commission électorale doit pouvoir relier une opération de vote à un électeur inscrit afin que cette personne soit notée « a voté ». Mais ce processus n'a pas nécessairement besoin de révéler l'identité de l'individu à la commission : celle-ci pourrait simplement vérifier que le votant est inscrit pour participer à cette élection, et enregistrer qu'il ou elle a voté une fois son choix fait, le tout sans corréler le vote et l'électeur.

Les projets qui minimisent la dissémination de ce qu'on appelle les données à caractère personnel sont encore rares, en partie parce qu'ils ne sont pas faciles à monétiser, que ce soit en devise ou en contrepartie de données personnelles.

Un exemple de projet allant dans ce sens est Blockcerts, une série de bibliothèques de référence gratuites développée par le MIT Media Lab et l'entreprise Learning Machine, où je travaille. Blockcerts permet aux individus de conserver leurs avoirs numériques dans un portefeuille privé hébergé sur leur propre matériel électronique. Les documents communiqués à une personne ne sont associés à aucune identité, à moins que le récipiendaire n'en fasse le choix. Le code source du logiciel est ouvert : on peut donc l'inspecter pour en vérifier l'intégrité et n'importe qui peut l'utiliser en vue de créer ses propres applications pour envoyer, stocker, partager et vérifier des documents officiels. Cette approche est un pas vers ce que certains, dans le domaine de l'identité numérique, ont appelé identité autosouveraine, ce qui signifie que les individus ont le contrôle sur leurs propres données.

Les blockchains sont véritablement une technologie de rupture, qui remet en cause les manières d'envisager la confiance. Mais si les applications s'appuyant sur ces outils ne sont pas conçues dans un souci d'autosouveraineté numérique, rien en principe n'empêchera de traiter les humains comme autant d'objets dans une chaîne logistique, dont chaque mouvement et activité est enregistré, peut-être de façon permanente. Créer des identités numériques dont l'existence soit indépendante des États et des grandes entreprises est le prochain grand défi que nous posent les blockchains – un défi que cette technologie pourrait aussi nous aider à résoudre. ■

L'ESSENTIEL

> Nombre de patients obèses et diabétiques ayant subi une opération gastro-intestinale visant à les aider à perdre du poids ont retrouvé une régulation normale de glucose dans le sang avant même de perdre du poids.

> L'opération consiste à réduire le volume de l'estomac et à

contourner la principale zone d'absorption des nutriments dans l'intestin, le duodénum.

> Le succès de cette approche suggère un lien entre le diabète de type 2 et un dysfonctionnement du tube digestif.

L'AUTEUR



FRANCESCO RUBINO
professeur titulaire de la chaire de chirurgie bariatrique et métabolique du King's College London et chirurgien à l'hôpital du King's College, à Londres

Un scalpel contre le diabète

La chirurgie bariatrique, qui court-circuite certaines parties du tube digestif, se révèle plus efficace contre le diabète de type 2 que les traitements classiques.

Quand j'ai commencé à étudier pour devenir chirurgien, il y a une vingtaine d'années, j'étais impatient de traiter des tumeurs, des calculs, des hernies et d'autres maladies à la portée d'un scalpel. La chirurgie semblait être une solution directe contre bon nombre de maux. Le diabète n'en faisait hélas pas partie. Les opérations concernent une partie précise du corps. Or les médecins savaient que le diabète endommage plusieurs organes en même temps et implique une faille étendue de la régulation de la concentration de glucose dans le sang par une hormone, l'insuline. Le scalpel n'était d'aucune utilité. C'est du moins ce que je croyais jusqu'à un après-midi de l'été 1999, où ma carrière a pris un tournant décisif.

Je venais tout juste de quitter l'Italie pour New York afin de me spécialiser en chirurgie mini-invasive à la faculté de médecine Icahn de l'hôpital du Mont Sinai. Alors que j'étais à la bibliothèque, absorbé dans la lecture des détails techniques de la dérivation biliopancréatique,

une information m'a frappé. Cette opération vise à faire perdre du poids aux patients souffrant d'une obésité sévère en raccourcissant le trajet des aliments à travers l'appareil digestif, de façon à court-circuiter des sections d'absorption des nutriments. Nombre de ces patients avaient un diabète de type 2. Or un mois seulement après l'opération, ces patients avaient retrouvé une glycémie – la concentration de glucose dans le sang – normale. Pourtant, ils n'avaient pas encore perdu beaucoup de poids, n'étaient soumis à aucune restriction de sucre ou de calories, et ne prenaient pas de médicaments contre le diabète. De plus, la plupart n'avaient manifesté aucun signe de la maladie pendant des années après l'opération. Comment une opération pouvait-elle suffire à redonner une glycémie normale dans une maladie connue comme chronique, progressive et irréversible?

Recherchant une explication, je me suis souvenu de l'existence des incrétines. Produites par l'intestin grêle à la suite d'un repas riche en glucides ou en lipides, ces hormones stimulent le pancréas, lequel se met à produire plus d'insuline. Cette dernière favorise le stockage du



glucose dans le foie, le tissu adipeux et les muscles, diminuant ainsi sa concentration dans le sang. Lorsque ces tissus qui stockent le glucose deviennent insensibles à l'insuline, le pancréas s'épuise en produisant plus d'insuline pour compenser cette résistance. Le diabète de type 2 apparaît quand trop de glucose reste dans le sang (voir l'encadré page 53). La modification anatomique due à l'opération agissait-elle sur les incrétones? Ou corrigeait-elle d'autres mécanismes encore inconnus de la maladie, abrités par l'intestin? Quoi qu'il en soit, la chirurgie apparaissait comme une nouvelle piste pour traiter le diabète. Et comprendre comment elle agit aiderait peut-être à élucider le mystère qui entoure l'apparition d'un diabète de type 2.

À cette époque, à la fin des années 1990, on prenait tout juste la mesure de la progression mondiale de diabète, qui se poursuit aujourd'hui. Selon les dernières estimations de la Fédération internationale du diabète, 425 millions de personnes dans le monde étaient atteintes de la maladie en 2017; elles devraient être plus de 629 millions en 2045. Parmi elles, 90% ont un diabète de type 2. Les autres sont atteintes du diabète de type 1, une forme auto-immune de la maladie dans laquelle les cellules sécrétant l'insuline disparaissent peu à peu et le pancréas ne produit plus assez d'hormone. Trouver la cause du diabète et le moyen de le traiter sauverait donc des millions de vies. On estime en

refusée, et ce à plusieurs reprises au cours des mois suivants.

Ce refus nous a déçus, mais ne nous a pas surpris. Depuis longtemps, on traitait le diabète au moyen d'un régime, de médicaments et d'injections d'insuline. On supposait que la maladie était due à un dysfonctionnement des cellules du pancréas qui produisent l'insuline et à la façon dont l'organisme gérait cette hormone. Soigner les patients en éliminant des parties de leur appareil digestif passait pour de la pure folie.

Aujourd'hui, deux décennies plus tard, la folie devient sagesse. Des dizaines d'études menées chez l'animal et au moins douze essais cliniques impliquant des centaines de personnes ont exploré les effets, sur le diabète de type 2, d'opérations visant à faire perdre du poids. Toutes ont montré que la réduction de la surface de l'appareil digestif – plus particulièrement de l'estomac et du début de l'intestin grêle – avait plus d'effet sur cette maladie que toute autre thérapie existante.

DES PREUVES DEPUIS 1925

Au cours des semaines qui ont suivi ma découverte à la bibliothèque, alors que notre proposition de tester la chirurgie chez les diabétiques continuait d'être ignorée, je me suis plongé dans la littérature médicale à la recherche de preuves en faveur de mon hypothèse. J'ai ainsi appris que, depuis déjà près d'un siècle, des médecins étudiaient les effets de la chirurgie gastro-intestinale – ou chirurgie bariatrique –, qui vise à restreindre l'absorption des aliments, sur le diabète. Un article publié en 1925 dans *The Lancet* décrivait la disparition presque instantanée de l'excès de sucre dans l'urine, l'un des symptômes du diabète, après une opération gastro-intestinale pour traiter un ulcère peptique (des lésions dans la paroi de l'estomac et du duodénum, la partie initiale de l'intestin grêle). Quand, au milieu des années 1950, la chirurgie gastro-intestinale est devenue un traitement contre l'obésité, ce type d'observation s'est multiplié. Durant les années 1980 et 1990, de nombreuses études ont rapporté les effets antidiabétiques de cette chirurgie, dont celle, emblématique, du chirurgien Walter Pories, de l'université de Caroline de l'Est, et ses collègues, menée sur plus de 120 patients et au titre évocateur: «Qui aurait pu le deviner? Une opération se révèle le traitement le plus efficace contre le diabète.»

Malgré l'accumulation des preuves, la chirurgie ne parvenait pas à s'imposer parmi les thérapies envisagées contre le diabète. Pour nombre de médecins, les effets bénéfiques contre cette maladie étaient dus à la perte de poids postopératoire plutôt qu'à l'opération elle-même. J'étais convaincu du contraire, mais encore fallait-il le prouver. Puisque nous ne

Suite page 51

Dans les années 1990, utiliser la chirurgie contre le diabète passait pour pure folie

effet qu'en 2015, 1,6 million de décès dans le monde étaient directement imputables au diabète, selon l'Organisation mondiale de la santé.

Après une nuit blanche, j'ai fait part de mon idée à Michel Gagner, mon superviseur. Il m'a tout de suite soutenu. Ensemble, nous sommes allés voir les dirigeants de la faculté de médecine: nous souhaitions réaliser une étude clinique pour évaluer si la chirurgie était plus efficace que les traitements classiques contre le diabète, même en l'absence d'obésité sévère. Malheureusement, notre proposition a été

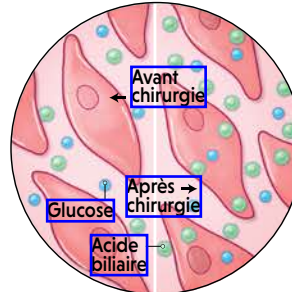
(Suite de la page 50)

COMMENT LA CHIRURGIE AGIT SUR LE DIABÈTE

Une des opérations les plus couramment pratiquées en chirurgie bariatrique est la dérivation gastrique Roux-en-Y. Cette intervention consiste à réduire le volume de l'estomac et la longueur de l'intestin grêle en contournant la principale zone d'absorption des nutriments. Non seulement elle réduit la quantité de calories absorbées, mais elle amplifie la stimulation des cellules intestinales au passage des nutriments, modifiant ainsi l'action de différents acteurs intestinaux de régulation de la glycémie.

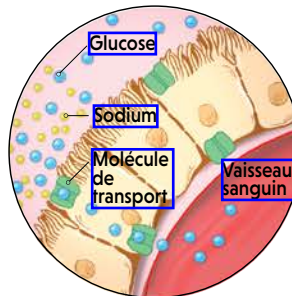
La chirurgie bariatrique, qui s'adresse au départ aux personnes atteintes d'obésité morbide ou sévère et consiste à réduire la surface de l'appareil digestif, se révèle très efficace contre le diabète de type 2.

Aujourd'hui, plus de 40 sociétés médicales la recommandent contre cette maladie. Les chercheurs commencent à identifier les mécanismes par lesquels ce type d'opération améliore le contrôle de la glycémie.



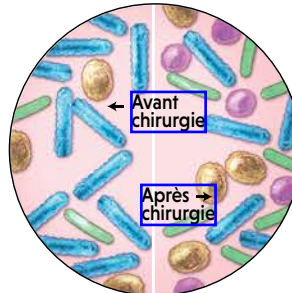
Les acides biliaires

Issus du foie, ces acides sont libérés dans l'intestin grêle où ils contribuent à la digestion. Ils se retrouvent ensuite dans le sang, où ils sont impliqués dans la régulation du glucose. La chirurgie augmenterait leur circulation dans le sang, ce qui amplifierait leur action sur la régulation du glucose.



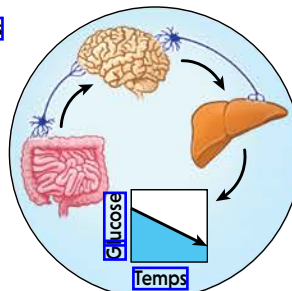
Les transporteurs de glucose

Lors de la digestion, le glucose des aliments est transporté à travers la paroi intestinale jusqu'à dans le sang. Certaines molécules qui le transportent ont besoin de sodium pour fonctionner. Or, après la chirurgie, une source importante de sodium – la bile – est écartée du trajet des nutriments.



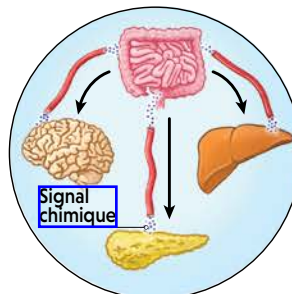
Le microbiote intestinal

La communauté microbienne de l'appareil digestif joue un rôle dans la digestion et le métabolisme du glucose. En modifiant l'équilibre intestinal, la chirurgie modifie la population microbienne, ce qui pourrait favoriser la perte de poids et améliorer la régulation du glucose.



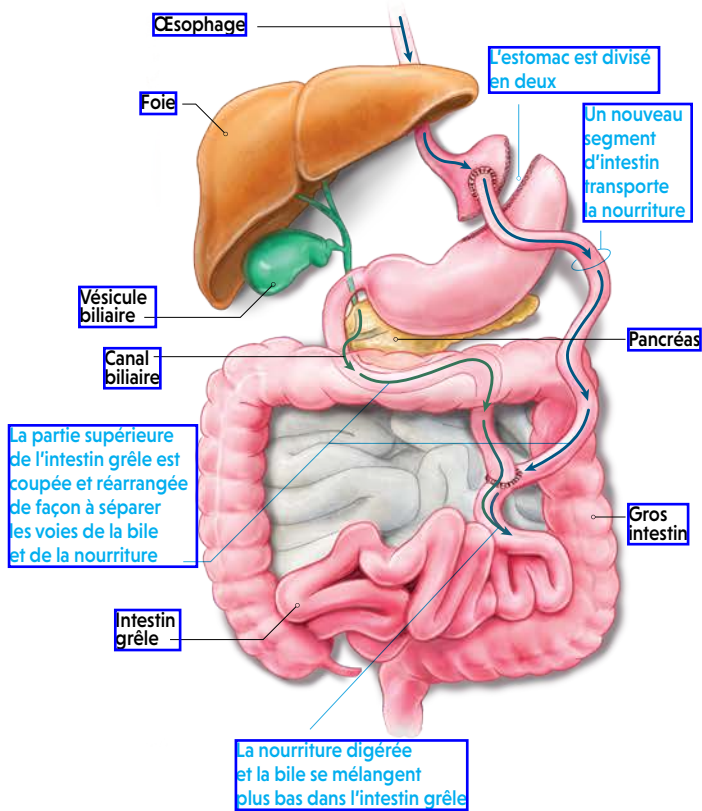
Les circuits neuronaux

Le nerf vague et d'autres circuits neuronaux relient l'intestin au cerveau, l'avertissant lorsque des nutriments traversent le tube digestif. En réponse, le cerveau interrompt la production de glucose dans le foie. Les opérations gastro-intestinales semblent amplifier ce mécanisme.



Les hormones intestinales

La paroi de l'appareil digestif contient des cellules spécialisées qui libèrent des hormones au contact des nutriments. Ces hormones interviennent dans la régulation du glucose, notamment en stimulant la production d'insuline dans le pancréas. La chirurgie bariatrique raccourcit certains segments intestinaux, ce qui modifie la quantité d'hormones sécrétées.



➤ pouvions pas mener d'études cliniques, je me suis tourné vers les rats pour expérimenter les effets de la chirurgie bariatrique sur le métabolisme du glucose, indépendamment du changement de poids. Ainsi, à l'Institut européen de téléchirurgie de Strasbourg, mes collègues et moi avons mené des expériences sur des rats minces atteints du diabète de type 2.

Sur ces rongeurs, nous avons réalisé une dérivation duodéno-jéjunale, une opération qui consiste à court-circuiter la partie supérieure de l'intestin grêle, le duodénum (la zone principale d'absorption des nutriments), et une portion de la partie intermédiaire, le jéjunum, sans toucher à l'estomac. L'objectif était de ne pas limiter la prise alimentaire, contrairement aux opérations qui réduisent le volume gastrique. Après l'opération, les rats avaient retrouvé une glycémie normale, que leur prise alimentaire ou leur poids aient changé ou non.

LA CHIRURGIE, PLUS EFFICACE QUE LES MÉDICAMENTS ?

D'autres études utilisant la dérivation duodéno-jéjunale ou des procédés similaires chez différents modèles animaux ont corroboré ces résultats. Puis, au cours de la dernière décennie, plusieurs équipes à travers le monde ont enfin pu réaliser des essais cliniques comparant les effets à moyen terme des opérations à ceux des traitements médicamenteux, comme je souhaitais le faire il y a une vingtaine d'années. L'un d'eux, publié en 2015, a été mené par Geltrude Mingrone, de l'université catholique de Rome, d'autres collègues et moi-même, sur 53 patients obèses ayant développé un diabète de type 2.

Un tiers ont reçu un traitement médicamenteux, tandis que les autres ont subi une opération – la moitié une dérivation gastrique « Roux-en-Y » (voir l'encadré page 51), l'autre une dérivation biliopancréatique. Dans les deux cas, leur estomac a été tronqué et raccordé à la portion intermédiaire de l'intestin grêle, le jéjunum, en contournant la portion supérieure de l'intestin grêle, le duodénum (selon la façon dont on tronque l'estomac, l'opération porte l'un ou l'autre nom). Cinq ans après l'opération, 50% des patients opérés étaient en rémission de leur diabète. Ce n'était le cas d'aucun de ceux traités par médicaments.

De même, en 2017, Philip Schauer, de la clinique de Cleveland, aux États-Unis, et ses collègues, ont montré dans un essai mené sur 96 patients atteints de diabète de type 2 que cinq ans après une opération de chirurgie bariatrique, ils n'étaient plus que 12% à avoir besoin d'injections d'insuline, contre 46% avant l'opération. Enfin, en 2004, une étude suédoise ayant suivi plus de 1000 patients obèses pendant 10 ans – certains ayant subi une opération, d'autres non – a montré que les risques de

complication associés à l'obésité tels que l'accident cardiovasculaire ou le diabète étaient réduits dans le groupe des personnes opérées.

Par ailleurs, ces opérations ne sont pas plus risquées que d'autres réalisées couramment, comme l'ablation de la vésicule biliaire ou de l'utérus. En outre, plusieurs analyses économiques suggèrent que le coût d'une telle inter-

Cinq ans après l'opération, 50% des patients étaient en rémission

vention (environ 17500 à 22000 euros) est équivalent, aux États-Unis comme en France, à celui de deux ou trois ans de soins et de médicaments antidiabétiques.

Si ces opérations sont un succès, les mécanismes impliqués restent encore débattus. Une chose est certaine: l'appareil gastro-intestinal joue un rôle clé dans le métabolisme du glucose et dans ses dysfonctionnements. Et ce *via* au moins cinq acteurs différents qui participent à la régulation de la glycémie et sur lesquels la chirurgie bariatrique pourrait influencer: les acides biliaires, les molécules qui transportent le glucose, le microbiote intestinal, les circuits neuronaux et les hormones.

Les acides biliaires sont produits dans le foie et libérés par le biais de la bile dans l'intestin. On connaît surtout leur fonction dans la digestion, mais ils jouent aussi d'autres rôles lorsqu'ils retournent vers le foie *via* la circulation sanguine. Notamment, ils participent à l'activation de deux protéines, les récepteurs FXR et TGR5, produites par de nombreux tissus clés dans le métabolisme du glucose, comme le tissu adipeux, le muscle squelettique et le pancréas, et impliquées dans la régulation du glucose. Il est possible que la chirurgie gastrique augmente la circulation d'acides biliaires dans le sang, amplifiant ainsi l'action de ces récepteurs.

La chirurgie pourrait aussi modifier l'action de molécules qui introduisent le glucose ingéré dans l'organisme. Au cours de la digestion, les molécules complexes des aliments sont décomposées en nutriments, dont le glucose. Des

Pour fonctionner, nos cellules ont besoin d'un apport continu de glucose. Or ce dernier arrive dans l'organisme par pics lors des repas. C'est grâce

La résistance à l'insuline augmente progressivement avec l'âge, mais elle est accentuée par l'obésité et la sédentarité. Une augmentation de l'activité physique associée à une meilleure alimentation, voire à une perte de poids, suffit parfois à retarder l'arrivée du diabète. Mais quand ces mesures sont inefficaces, le médecin a le choix entre plusieurs médicaments, qu'il prescrit selon l'avancement de la maladie.

A histological section of the small intestine, stained with hematoxylin and eosin (H&E). The image shows the mucosal folds (villi) and the underlying crypts. The villi are covered by a simple columnar epithelium. A scale bar in the bottom left corner indicates 500 μm.



“

> protéines de la paroi intestinale nommées SGLT1 capturent le glucose et le transportent à l'intérieur de la muqueuse intestinale. Puis d'autres transporteurs l'acheminent jusqu'au sang. Les transporteurs SGLT1 nécessitent des quantités importantes de sodium pour fonctionner correctement. Or, après certains types d'opération bariatrique, le nouveau trajet des nutriments contourne les sources d'approvisionnement en sodium – la bile et les sucs digestifs. Sans sodium, le transport du glucose de la lumière intestinale vers la muqueuse est ralenti, ce qui atténue les pics de glucose dans le sang après les repas.

LE MICROBIOTE, ACTEUR DU DIABÈTE ?

Les milliards de microorganismes hébergés par notre système digestif – notre microbiote intestinal – joueraient aussi un rôle dans le métabolisme du glucose. Certaines espèces de bactéries intestinales aident l'organisme à extraire de l'énergie de la nourriture et produisent des molécules qui réduisent l'inflammation et la résistance à l'insuline. Or, en modifiant non seulement l'acidité dans le tube digestif, mais aussi la quantité et la composition des nutriments qui arrivent dans l'intestin, la chirurgie bariatrique change la population microbienne locale. Cela aurait-il un effet sur le métabolisme ? C'est ce que suggèrent les travaux publiés en 2013 par Lee Kaplan, de la faculté de médecine de l'université Harvard, et ses collègues.

Les chercheurs ont réalisé une dérivation gastrique Roux-en-Y sur un groupe de souris. Leur microbiote s'en est trouvé modifié, notamment enrichi en bactéries des genres *Escherichia* et *Akkermansia*. Quelques semaines plus tard, ils ont transféré le microbiote intestinal de ces rongeurs chez des souris sans microbiote et qui n'avaient pas subi d'opération. Ces dernières, soumises ensuite à un régime riche en matières grasses, ont pris peu de poids et avaient une glycémie plus équilibrée que des souris ayant reçu le microbiote de souris non opérées, ce qui suggère un effet bénéfique de la nouvelle composition bactérienne.

La chirurgie bariatrique a par ailleurs un quatrième effet, bien connu, sur les circuits neuronaux intervenant dans le métabolisme. L'un d'eux, notamment, relie l'intestin et le cerveau grâce à un long nerf, le nerf vague. Grâce à lui, l'intestin grêle détecte d'infimes quantités de nutriments ingérés et en informe le cerveau, lequel, en retour, interrompt la production de glucose dans le foie, diminuant ainsi sa concentration sanguine. En 2012, Tony Lam, de l'université de Toronto, et ses collègues ont observé chez des rats que ce mécanisme de détection des nutriments était amplifié après une dérivation duodéno-jéjunale, peut-être parce que, les nutriments ne traversant plus le

duodénum, ils arrivent en plus grande quantité dans le jéjunum.

Enfin, le dernier élément, et non des moindres, sur lequel les opérations bariatriques ont un impact est le système hormonal. La paroi de l'appareil gastro-intestinal contient des cellules spécialisées qui libèrent des hormones au contact des nutriments. La chirurgie bariatrique modifie le trajet des nutriments et donc le temps qu'ils passent au contact de ces cellules. Dans certaines sections du tube digestif, le contact est réduit, tandis qu'il augmente dans d'autres. De plus, une quantité plus importante de nutriments atteint les segments suivant la partie tronquée. L'ensemble de ces effets modifie la production hormonale, augmentant ou réduisant la sécrétion de telle ou telle hormone.

La ghréline, par exemple, est une hormone qui stimule l'appétit et diminue la dépense énergétique. Or la partie de l'estomac qui produit la ghréline est retirée ou écartée du trajet des aliments dans la plupart des opérations bariatriques. Des études menées en 2002 par David Cummings, de l'université de Washington, ont mis en évidence, chez des patients ayant subi une telle opération, une diminution marquée de la concentration de ghréline dans le sang.

BIBLIOGRAPHIE

J.-B. Cavin et al., **Intestinal adaptations after bariatric surgery : Consequences on glucose homeostasis**, *Trends in Endocrinology and Metabolism*, vol. 28(5), pp. 354-364, 2017.

F. Rubino et al., **Time to think differently about diabetes**, *Nature*, vol. 533, pp. 459-461, 2016.

J.-B. Cavin et al., **Differences in alimentary glucose absorption and intestinal disposal of blood glucose following Roux-en-Y gastric bypass vs sleeve gastrectomy**, *Gastroenterology*, vol. 150, pp. 454-464, 2016.

A. D. Miras et C. W. le Roux, **Mechanisms underlying weight loss after bariatric surgery**, *Nature Reviews of Gastroenterology and Hepatology*, vol. 10, pp. 575-584, 2013.

LA PISTE DES INCRÉTINES

Les opérations gastro-intestinales ont aussi des effets sur les incrétines, ces hormones produites dans l'intestin et qui stimulent la sécrétion d'insuline. Dans les années 2000, Carel Le Roux, maintenant professeur à l'University College Dublin, a montré avec d'autres que la dérivation gastrique Roux-en-Y et des procédés similaires augmentent la sécrétion des incrétines. À la suite de ces interventions, le nouveau parcours digestif contourne la principale zone d'absorption des nutriments. Ces derniers arrivent donc en plus grandes quantités dans la partie inférieure de l'intestin grêle, ce qui provoquerait une production amplifiée d'incrétines, et donc d'insuline.

Par ailleurs, il existe probablement un autre mécanisme qui contrebalance l'effet des incrétines. Cette hypothèse est née du constat suivant : sans un tel mécanisme, le corps serait envahi d'insuline à la fin de chaque repas et tout le monde souffrirait d'hypoglycémie – une concentration anormalement basse de glucose dans le sang. À l'inverse, un contrepoids trop important freinerait la réponse de l'organisme à l'insuline – en d'autres termes conduirait à un diabète de type 2. Les molécules à l'origine de ce contrepoids, que j'appelle les « anti-incrétines », n'ont pas encore été clairement identifiées. Mais des candidats commencent à émerger. Par exemple, des hormones de l'appareil digestif comme la somatostatine 28 et la galanine réduisent la sécrétion d'insuline chez les rongeurs. Et en 2013, Geltrude Mingrone,



MANCHON DUODÉNOJÉJUNAL

Un tube en plastique souple glissé dans l'intestin *via* la gorge et l'estomac pourrait constituer un substitut intéressant et moins invasif à la chirurgie bariatrique.

à Rome, et ses collègues ont prélevé des protéines non identifiées dans une section de l'appareil gastro-intestinal chez des souris diabétiques. Quand ils ont injecté ces protéines chez des souris non diabétiques, leurs tissus sont devenus résistants à l'insuline. Les protéines avaient le même effet lorsqu'elles étaient injectées dans des cellules musculaires d'humains non diabétiques cultivées en laboratoire. Ma conviction est que la chirurgie bariatrique peut réduire la quantité ou la disponibilité de ces anti-incrélines, et donc aider à retrouver un équilibre métabolique.

Quel que soit le mécanisme exact, l'ensemble des observations dans ce domaine suggèrent que le diabète a une origine gastro-intestinale. Les mécanismes du dysfonctionnement intestinal déclenché par l'apport de nourriture expliqueraient aussi comment l'augmentation mondiale, ces dernières années, de nourriture riche en matières grasses et en glucides, ainsi que l'augmentation de la disponibilité générale de la nourriture dans de nombreux pays, ont pu causer une telle épidémie.

La chirurgie est un remède puissant contre le diabète, mais elle ne peut être envisagée comme un traitement systématique contre une maladie aussi répandue. Car, au-delà du personnel hautement qualifié et de la place dans les hôpitaux qu'elle nécessite, sa pratique comporte des facteurs de risque inhérents à

l'utilisation d'un scalpel sur un patient. Il est donc important de réfléchir à des solutions moins invasives. Certaines sont d'ores et déjà à portée de main, comme l'insertion dans l'intestin d'un manchon *via* la gorge et l'estomac.

L'objectif est de recouvrir la paroi interne du duodénum. C'est dans cette région que la bile et les sucs pancréatiques entrent en contact avec la nourriture partiellement digérée, altérant les caractéristiques chimiques de tout ce qui continue à descendre le long du tube digestif. La présence de ce manchon suffit à influencer sur l'appareil gastro-intestinal en aval et sur la plupart des mécanismes de contrôle glycémique décrits plus haut.

DU SCALPEL AU MANCHON

Dans une série d'expériences, mes collègues et moi avons inséré un tube flexible en silicone dans le duodénum de rats diabétiques. Les particules de nourriture n'ont ainsi pas touché les cellules de la paroi du duodénum et ne se sont pas mélangées avec la bile. Nous avons observé une nette amélioration du contrôle de la glycémie. Dans un second temps, nous avons percé des trous dans le tube afin de laisser la bile et les sucs pancréatiques entrer et les nutriments sortir. Cette modification a suffi à annuler les effets antidiabétiques précédemment observés.

Les manchons en plastique flexible à insérer dans le duodénum existent déjà. Développés pour imiter les effets de la chirurgie de dérivation gastrique, ils ont été approuvés pour une utilisation clinique en Europe et en Amérique du Sud. Les patients qui en ont bénéficié ont vu leurs symptômes diabétiques s'améliorer. Une nouvelle approche est actuellement à l'essai chez l'humain : elle consiste à glisser un petit ballon accroché à un tube jusqu'au duodénum en passant par la gorge. Celui-ci est ensuite rempli d'eau chaude afin de brûler certaines des cellules qui réagissent au contact des nutriments. Les tests préliminaires ont des résultats prometteurs sur le diabète de type 2. De nouvelles investigations sont sur le point de confirmer la durabilité à long terme de ces effets.

Ce n'est pas la première fois en médecine que la chirurgie pave le chemin à d'autres sortes de traitements. C'est même déjà arrivé pour le diabète. En 1889, le médecin allemand Oskar Minkowski a ainsi provoqué un diabète chez des chiens en leur enlevant le pancréas : cette découverte a conduit les médecins canadiens Frederick Banting et Charles Best à découvrir l'insuline en 1921. Près d'un siècle plus tard, le succès de la chirurgie bariatrique lève le voile sur le rôle de l'appareil gastro-intestinal dans la régulation de la glycémie. C'est désormais vers lui que se tournent les chercheurs et médecins pour développer de nouvelles approches thérapeutiques contre le diabète. ■





Éphémères deltas de lave

Le 31 décembre 2016, à Hawaïi, un delta formé en quelques années par des coulées de lave s'est effondré dans l'océan. Comment naît et meurt une telle plateforme, créée par le brusque refroidissement de la lave à son arrivée au contact de l'eau de mer ?
La réponse en images.

LES AUTEURS



MICHEL DETAY
est géologue et
photographe résidant
à Hong Kong.
Avec son épouse
Anne-Marie Detay,
il a publié *Volcans.
Du feu et de l'eau*
(Belin, 2013)



PIERRE THOMAS
est géologue et
planétologue,
professeur émérite
à l'École normale
supérieure de Lyon

A Hawaii, le Kīlauea, l'un des volcans les plus actifs de la planète, déverse sur ses flancs une lave nommée pāhoehoe, très fluide parce que pauvre en silice et complètement dégazée. Celle-ci s'écoule à l'intérieur de tunnels jusqu'à la mer. Ses arrivées successives édifient régulièrement des plateformes instables qui s'avancent sur la mer: des «deltas de lave». Les images que nous présentons ici sont celles du delta de Kamokuna, depuis sa formation récente jusqu'à son effondrement fin 2016.

Les deltas de lave doivent leur existence au fait que des tunnels – les tubes de lave – acheminent la lave jusqu'au rivage sans grande déperdition de chaleur: la température baisse de moins de 0,6 °C par kilomètre parcouru. Situé sur la pente est du volcan, le tunnel de lave de Kazumura, par exemple, franchit 1102 mètres de dénivelé et s'étend sur plus de 65 kilomètres! En interagissant avec l'eau de l'océan, les laves produisent tout un cortège de matériaux, la plupart fragiles, qui vont constituer le soubassement des deltas. Généralement, les deltas de lave se développent sur une largeur d'environ 1 kilomètre et s'avancent de plusieurs centaines de mètres dans la mer. Des croissances journalières atteignant 4 hectares ont déjà été observées dans le cas d'un delta, qui, juste avant de s'effondrer, mesurait 2,9 kilomètres de long et 500 mètres de large.

Les deltas de lave disparaissent et se reforment le plus souvent de façon cyclique. Ainsi, à Hawaii, 31 effondrements se sont produits en 15 mois, entre 1988 et 1989. L'effondrement peut s'accompagner d'un retrait de la côte de plusieurs centaines de mètres: il était compris entre 200 et 400 mètres dans les cas récents. ■



L'ÉDIFICATION DU DELTA

Au cours de la formation d'un nouveau delta de lave, des coulées de lave pāhoehoe, très fluide, débouchent dans l'océan. Celles visibles sur cette image nocturne sont des coulées en surface; elles sont accompagnées de coulées invisibles, qui cheminent à l'intérieur de tunnels souterrains.



© D. Fier/Shutterstock.com



DES INTERACTIONS LAVE-EAU PEU VIOLENTES

Quand la coulée de lave pāhoehoe atteint la mer, les interactions entre la lave et l'eau marine sont en général assez peu violentes. La lave s'écoule simplement en draperies par-dessus les anciennes falaises et contribue à édifier la plateforme qui, petit à petit, s'avance dans l'océan.



MISE EN PLACE DU DELTA DE LAVE DE KAMOKUNA

Un passage en hélicoptère au-dessus du champ de lave du Kilauea offre l'occasion de contempler le delta de Kamokuna entier. La zone d'épanchement des laves en bordure d'océan se distingue très bien. On remarque l'une des routes du Parc national des volcans d'Hawaï, dont un tronçon a été recouvert par la coulée.

© D. Fier/Shutterstock.com

© USGS

QUAND UNE BULLE DE LAVE ÉCLATE

La lave pāhoehoe chemine jusqu'à la mer à l'intérieur de tubes de lave, sorte de plomberie volcanique. L'effondrement partiel du delta produit des fronts où débouchent ces tubes (voir les images des pages suivantes). Outre la vapeur formée quand la lave arrive au contact de la mer, il arrive que des vagues pénètrent dans les tubes, où une arrivée de lave vient recouvrir l'eau de mer encore froide. Instantanément vaporisée, celle-ci produit une bulle de lave qui éclate en crevant le plafond du tube. Ce phénomène, après refroidissement et solidification, produit ce que l'on nomme des cheveux de Pele, du nom de la déesse hawaïenne des volcans, du feu et des éclairs : de fins filaments qui font penser à des cheveux.



PEU AVANT L'EFFONDREMENT DU DELTA

Cette photo aérienne a été prise en hélicoptère le 30 juillet 2008 alors que le delta de lave de Kamokuna progressait dans l'océan. L'effet de son érosion par les vagues est perceptible : une plage de sable noir s'était formée. Des lignes de fracture traduisent la fragilité de cet édifice et annoncent son effondrement. L'absence de coulées en surface indique que la lave s'écoule principalement au sein de tunnels de lave. Seule une légère fumée bleue, visible en haut à droite, trahit la chaleur interne du delta. Peu visibles, des dépôts de soufre sont présents en plusieurs endroits du delta. La photographie du bas montre le delta déjà à moitié effondré, alors que de la lave continue à arriver. L'effondrement total de ce delta s'est produit le 31 décembre 2016, précipitant une surface de 11 hectares dans la mer.



© Jean-François Gonze



© L. Pier/Shutterstock.com

© Josh Sasaki/Getty Images



CASCADE DE LAVE

Le 25 février 2017, un effondrement partiel dans l'océan a mis au jour l'un des tunnels de lave alimentant la coulée de lave qui a construit le delta de Kamokuna, sur le flanc du volcan Kīlauea. La section du delta a créé une falaise, où le tunnel de lave débouche à 28 mètres au-dessus du niveau de la mer. Dans l'océan, la lave produit des explosions hydrovolcaniques accompagnées de projections de « bombes » et de téphras (éjectas divers). Depuis le début de 2017, le phénomène est devenu célèbre et a attiré de nombreux touristes, qui se mettent en danger lorsqu'ils s'approchent à moins de 300 mètres de la zone active.



© Michel Delaunay

CASCADE ET EXPLOSIONS DE TÉPHRAS

Prises le 25 février 2017 vers 9 heures du matin, depuis le haut de la falaise formant le nouveau trait de côte, les photographies ci-dessus montrent les manifestations hydrovolcaniques caractéristiques de l'arrivée d'une cascade de lave directement dans la mer. Ainsi, les explosions engendrées par le contact de la lave avec l'eau créent de nombreux jets de cendres, de téphras et de bombes volcaniques. Les deux autres clichés pris respectivement le 21 février (*ci-contre*) et le 6 mars (*ci-dessous*) montrent des détails des cascades de lave, que les volcanologues américains nomment *firehoses* (« tuyaux de feu »). La photographie ci-dessous, par exemple, a saisi les figures caractéristiques créées par la dislocation de la lave, due à l'appel du vide lors de la sortie de la lave à l'air libre.



© Michel Delaunay





LES DELTAS DE LAVE MODIFIENT SANS CESSER LE TRAIT DE CÔTE

Le 3 janvier 2017, l'imageur OLI (*Operational Land Imager*) du satellite *Landsat 8* révéla le nouveau trait de côte créé par l'effondrement du delta de lave de Kamokuna (*ci-dessous*). Le lieu de l'effondrement est indiqué (*flèche rouge*). Non loin de lui, une nouvelle coulée se signale par un panache de vapeur. L'ensemble de la côte est marqué par des effondrements successifs reconnaissables à leurs formes en arc de cercle. Ci-dessus, la même côte en voie de transformation prise en novembre 2017, c'est-à-dire avant que la période d'effondrement ne débute.



BIBLIOGRAPHIE

M. Detay, **Traité de volcanologie physique**, Lavoisier, 2017.

G. Marie, **Processus préparant la construction et l'érosion des deltas de lave formés par les coulées du volcan Kilauea (Pu'u O'o-Kupaianaha, Hawaï)**, *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 12(2), pp. 75-90, 2006.

T. N. Mattox et M. T. Mangan, **Littoral hydrovolcanic explosions : A case study of lava-seawater interaction at Kilauea Volcano**, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 75, pp. 1-17, 1997.

L'ESSENTIEL

> Dans l'expérience *LHCb*, au collisionneur LHC du Cern, les physiciens recherchent notamment des indices de l'existence de particules non prévues par la théorie en vigueur, le « modèle standard ».

> Au lieu de viser la production directe de ces nouvelles particules, les chercheurs

de *LHCb* espèrent détecter leur influence indirecte, sous la forme de particules « virtuelles » servant d'intermédiaires dans certaines désintégrations.

> Certains des résultats obtenus semblent incompatibles avec le modèle standard. Il s'agit peut-être d'indices d'une physique non décrite par le modèle standard.

L'AUTEUR



GUY WILKINSON
physicien des particules à l'université d'Oxford, en Grande-Bretagne, et ancien porte-parole de l'expérience *LHCb* au Cern, à Genève

Beauté hors-norme au LHC

Malgré ses succès, tels que la prédiction et la découverte du boson de Higgs, le modèle standard de la physique des particules est incomplet. Au Cern, l'expérience *LHCb*, qui étudie les désintégrations des « particules de beauté », a-t-elle fourni les premiers indices d'une théorie plus fondamentale ?

Il est rare que le journal télévisé s'ouvre avec un reportage sur la recherche en physique, comme cela a été le cas le 4 juillet 2012. Ce jour-là, toutes les chaînes du monde ont consacré une partie de leur émission à une nouvelle en provenance de Genève : des recherches entamées il y a près d'un demi-siècle venaient d'aboutir avec la découverte du boson de Higgs au LHC (Large Hadron Collider), le Grand collisionneur de hadrons du Cern.

Pour les physiciens, l'événement était historique. Cette particule était en effet la dernière pièce manquante dans le modèle standard de la physique des particules ; plus même : le boson de Higgs est un élément essentiel de cette théorie, qui décrit les particules connues de l'Univers et les forces qu'elles exercent les unes sur les autres.

Pourtant, les physiciens pensent qu'il existe d'autres particules élémentaires que celles du modèle standard ; cette nouvelle traque, encore plus difficile, a déjà débuté.

Les complexes expérimentaux *Atlas* et *CMS*, qui ont permis de découvrir le boson de Higgs, joueront encore un rôle important dans cette nouvelle quête. Ils tenteront de produire directement ces nouvelles particules lors de collisions énergétiques entre protons. Mais une autre expérience du LHC, moins connue et plus modeste, contribuera aussi à cette recherche d'une nouvelle physique.

Ainsi, l'expérience *LHCb*, sur laquelle je travaille, aborde cette traque avec une stratégie différente : mettre en évidence des effets indirects de ces particules inconnues sans les produire directement. Pour ce faire, nous nous focalisons sur la production de certaines

Aperçu de la caverne qui abrite l'expérience LHCb, 100 mètres sous terre. Au cœur de cet assemblage de détecteurs, les physiciens réalisent des collisions de protons à haute énergie pour produire des particules renfermant des quarks *b*.



particules, les hadrons dits beaux, et nous cherchons à voir comment ces particules inconnues influent sur les caractéristiques de ces hadrons. Plus précisément, nous analysons ce qui se passe quand des hadrons beaux sont créés au LHC puis se désintègrent en d'autres particules. Les hadrons beaux font d'excellents objets d'étude, car ils se désintègrent de très nombreuses façons différentes; et nous disposons de prédictions très précises sur la façon dont ces réactions devraient se dérouler. Toute déviation par rapport à ces prédictions laisse alors soupçonner une manifestation de particules encore jamais observées.

Une telle recherche est complexe et requiert une grande précision. Mais elle a le potentiel de découvrir des particules qui pourraient rester hors de portée d'*Atlas* ou de *CMS*. Or l'expérience *LHCb* a d'ores et déjà donné plusieurs résultats qui ne sont pas en accord avec les prédictions du modèle standard. Si ces résultats sont confirmés, nous avons peut-être entre nos mains les premiers éléments pour comprendre les lois du monde à un niveau plus fondamental encore que tout ce que l'humanité a pu entrevoir jusqu'ici.

UN MODÈLE À SUCCÈS

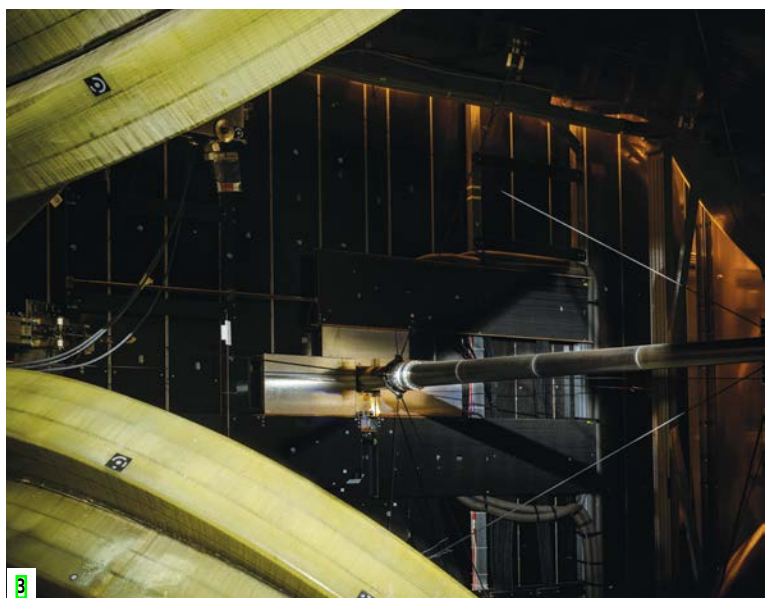
Le modèle standard, élaboré dans les années 1960 et 1970, a été extrêmement efficace pour décrire le comportement des particules élémentaires et les forces qui agissent sur elles. Il a été testé avec succès dans le cadre de nombreuses expériences.

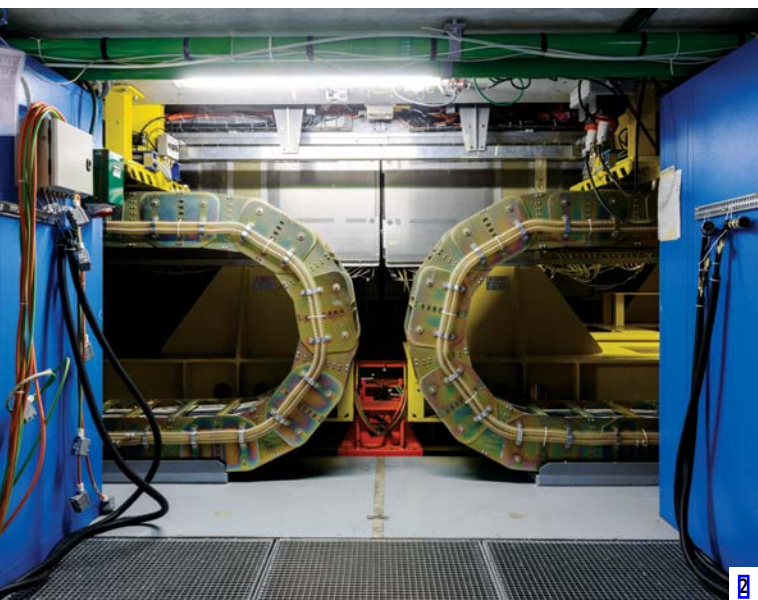
Pour résumer, dans ce modèle, les particules élémentaires dont la matière est constituée sont rangées en deux catégories: les quarks et les leptons (voir l'encadré page 68). Il existe six quarks répartis par paires dans trois groupes, nommés générations: *u* (ou *up*) et *d* (ou *down*), *c* (ou *charm*) et *s* (ou *strange*), *b* (ou *bottom*) et *t* (ou *top*). Les deux derniers ont eu plusieurs noms; le quark *b* a été un temps nommé *beauty* ou «beau».

Nous n'observons jamais ces quarks individuellement; ils se regroupent pour former des hadrons. Ainsi, les hadrons «beaux» mettent en jeu un ou plusieurs quarks *b*.

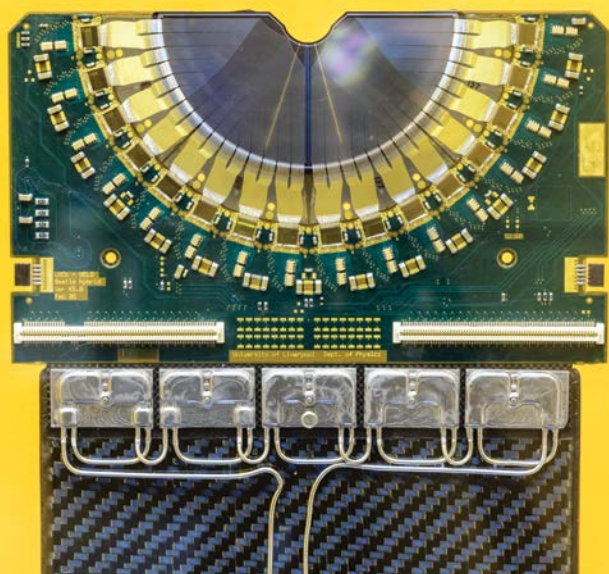
De façon analogue, il existe trois «générations» de leptons, chacune incluant deux particules: la première regroupe l'électron (*e*) et le neutrino électronique (ν_e), la deuxième le muon (μ) et le neutrino muonique (ν_μ), la troisième le tau (τ) et le neutrino tauique (ν_τ).

Les quarks *u* et *d* ainsi que l'électron (tous de la première génération) sont les constituants des atomes, c'est-à-dire de la matière ordinaire. Les particules des deux autres générations sont instables: elles ont une durée de vie très courte et se désintègrent en particules de la première génération; ces particules fugaces sont cependant produites en grands nombres dans les accélérateurs de particules.





2



4



6

LES DIVERSES FACETTES DE LHCb

Le dispositif expérimental pèse 5 600 tonnes et implique près de 700 scientifiques. Il est vu ici de côté (1) et de dessous (2). Des protons sont accélérés dans un tube (3) à des vitesses proches de celle de la lumière avant de pénétrer au cœur du dispositif où ils entrent en collision. Des détecteurs traquent les particules produites. L'un d'eux, nommé Velo (Vertex locator), utilise des capteurs en silicium (4) pour traquer les hadrons beaux. Pour limiter la quantité d'information stockée et à analyser, des processeurs sélectionnent les réactions les plus intéressantes (5). À l'intérieur de la salle de contrôle (6), les physiciens assurent le suivi des opérations.

Les hadrons sont des particules soumises à la force électromagnétique, à l'interaction faible et à l'interaction forte (la force gravitationnelle est aussi présente, mais à l'échelle subatomique elle est négligeable). Chacune de ces forces fondamentales est véhiculée par une particule: le photon est l'agent de l'interaction électromagnétique, les bosons W et Z sont les porteurs de l'interaction faible et les gluons sont les médiateurs de l'interaction forte. Le boson de Higgs a un rôle particulier, mais crucial: il est associé à un mécanisme qui confère une masse non nulle à certaines des particules citées précédemment.

Malgré les succès du modèle standard, les physiciens pensent que ce modèle est incomplet. Il serait une approximation, à faible énergie, d'une théorie plus fondamentale. En effet, le modèle standard rend très bien compte de certaines observations et mesures, mais il ne contient aucun élément de réponse pour d'autres. À l'échelle cosmique, il n'est pas en mesure d'expliquer pourquoi l'Univers est essentiellement constitué de matière, alors qu'au moment du Big Bang, la matière et l'antimatière ont dû être créées en proportions égales. Il ne nous renseigne pas davantage sur la nature de la matière noire. Cet excédent de masse dans l'Univers nous est invisible, mais son existence semble indispensable pour expliquer la dynamique des galaxies et des amas de galaxies.

LE MODÈLE STANDARD, UN TABLEAU INCOMPLET

Et même dans le monde des particules subatomiques connues, il subsiste de nombreuses énigmes. Le boson de Higgs s'est révélé avoir une masse qui n'est pas beaucoup plus élevée que celle des bosons W et Z, alors que le modèle standard suggère qu'il devrait être environ 10^{16} fois plus lourd! Et nous ne savons pas pourquoi les particules de matière se rangent en trois générations. Celles-ci semblent être des copies les unes des autres, mais avec une impressionnante hiérarchie des masses, depuis les quarks *u* et *d* qui ne «pèsent» presque rien, jusqu'au quark *t*, qui est presque aussi lourd qu'un noyau d'or.

Sur ces questions et beaucoup d'autres, le modèle standard ne dit rien. Ainsi, malgré une longue histoire de réussites éclatantes, le

Le modèle standard n'est clairement qu'une approximation, la face visible d'une théorie plus fondamentale dont nous espérons qu'elle apportera des solutions à toutes ces énigmes. L'objectif de l'expérience *LHCb*, comme celui d'*Atlas*, de *CMS* et de nombreuses autres dans le monde, est de découvrir des éléments de cette théorie plus complète sous la forme de nouvelles particules non incluses dans le modèle standard, mais prédites par cette théorie plus fondamentale.

Le Grand collisionneur de hadrons, qui abrite l'expérience *LHCb*, est un accélérateur circulaire de 27 kilomètres de long où deux faisceaux de protons de haute énergie circulent en sens opposés, à des vitesses proches de celle de la lumière. Dans *LHCb*, ces faisceaux entrent en collision jusqu'à 40 millions de fois par seconde. L'énergie accumulée quand les protons s'écrasent l'un sur l'autre peut donner naissance à des particules très différentes des protons de départ, par exemple des particules contenant des quarks *b*. Même si ces particules sont très éphémères, elles voient le jour et se désintègrent en d'autres particules plus stables, que les instruments de *LHCb* détectent tout en mesurant leurs caractéristiques (nature, énergie, etc.).

Bien que de taille modeste comparé à ses grands frères répartis sur l'anneau du LHC, le détecteur *LHCb* mesure tout de même une vingtaine de mètres de long et une dizaine de mètres de haut. Sa configuration allongée lui confère une apparence très différente des géométries cylindriques d'*Atlas* et de *CMS*. Cette géométrie étirée a été choisie pour optimiser l'étude des hadrons beaux.

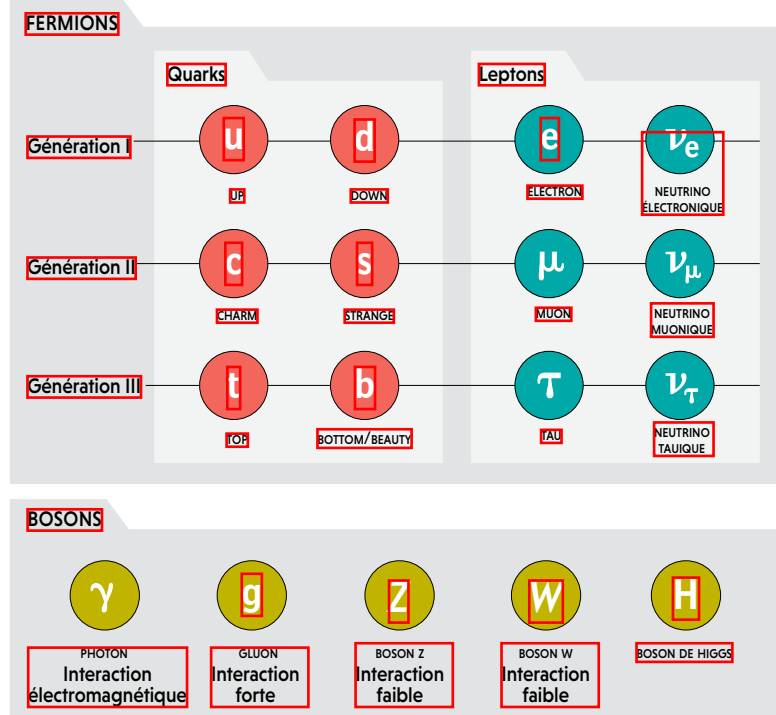
En effet, quand des hadrons beaux se forment au LHC, seule une petite partie de l'énergie accumulée dans la collision des protons est convertie en masse, car les hadrons beaux sont relativement légers (en unités d'énergie, autour de 5 GeV, ou gigaélectronvolts, ce qui est juste un peu plus lourd qu'un noyau d'hélium). L'excédent d'énergie tend à projeter les hadrons beaux nouvellement créés vers l'avant par rapport au point de collision, sur une trajectoire très proche des faisceaux de protons, d'où cette configuration allongée vers l'avant des détecteurs de l'expérience.

Même si son agencement est inhabituel, on retrouve dans *LHCb* beaucoup de composants utilisés dans les autres expériences : un gros aimant, des trajectographes pour reconstituer la trajectoire des particules produites lors des collisions et des calorimètres pour mesurer l'énergie des particules.

Plusieurs attributs sont cependant uniques à *LHCb* et ont été conçus spécifiquement pour la physique des particules de beauté. Par exemple, un détecteur au silicium de précision placé à juste 8 millimètres du

LE MODÈLE STANDARD

Le modèle standard décrit les particules élémentaires et leurs interactions (hors gravitation). Il inclut six quarks et six leptons (qui sont des « fermions », des particules de matière), ainsi que cinq bosons, qui véhiculent les forces fondamentales. Mais les physiciens pensent qu'il existe d'autres particules que celles du modèle standard ; ils tentent de les détecter grâce à des projets ambitieux tels que l'expérience *LHCb* (Large Hadron Collider beauty).



point de collision des protons permet de reconstituer avec précision le point de l'espace où les particules instables se désintègrent, un outil utile parce que les hadrons beaux se propagent typiquement vers l'avant sur un centimètre seulement avant de se désintégrer en un ensemble de particules plus légères. *LHCb* est également équipé d'un système Rich (Ring-Imaging Cherenkov), des détecteurs permettant d'identifier les particules produites lors de la désintégration des hadrons beaux. La nature des particules est déterminée à partir des motifs lumineux que nombre d'entre eux émettent en traversant ces détecteurs.

LA QUÊTE D'UNE NOUVELLE PHYSIQUE

Au cours de la première période d'exploitation du LHC, de 2010 à 2012, l'accélérateur a produit de l'ordre de 10^{12} hadrons beaux dans l'expérience *LHCb*. Ces particules se sont désintégrées de diverses façons, suivant des processus plus ou moins intéressants pour nous. En effet, nous recherchons des désintégrations susceptibles de servir de « poteaux indicateurs » d'une

nouvelle physique, en d'autres termes des comportements que le modèle standard ne parviendrait pas à expliquer.

Les physiciens théoriciens ont de nombreuses hypothèses sur la forme que pourrait revêtir cette nouvelle théorie. La plupart de ces pistes prévoient l'existence de nouvelles particules qui sont plus lourdes que celles que nous connaissons. Le LHC est particulièrement bien équipé pour les traquer: la grande énergie de ses collisions signifie qu'il peut produire et détecter des particules assez massives, jusqu'à quelques milliers de GeV (pour comparaison, les masses du boson de Higgs et du proton sont respectivement de 125 GeV et de 0,9 GeV).

Les expériences *Atlas* et *CMS* ont été conçues pour rechercher directement ces particules massives au travers des signatures caractéristiques que produiraient leurs désintégrations. Mais une autre approche possible est de détecter la présence de nouvelles particules par l'intermédiaire de leurs effets «virtuels» sur la désintégration des particules du modèle standard.

Pour comprendre la notion de particule virtuelle, nous devons nous pencher sur les diagrammes de Feynman (voir les figures ci-dessous). Le physicien américain Richard Feynman, mort en 1988, a conçu ces diagrammes comme une façon commode de

le LHC, et qu'on nomme un méson $\bar{B}^0$ (prononcé «B zéro barre»). Il s'agit d'un hadron composé d'un quark b et d'un antiquark $\bar{d}$ (les particules d'antimatière sont notées avec le suffixe «barre»). Dans les diagrammes, le temps s'écoule de gauche à droite. Dans le premier cas, nous voyons que le méson initial se désintègre en un méson D^{*+} (constitué d'un quark c et d'un antiquark $\bar{d}$), un lepton tau à charge négative (τ^-) et un antineutrino tauique ($\bar{\nu}_\tau$); par conséquent, on note le processus: $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$.

L'autre désintégration, $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$, produit un méson $\bar{K}^{*0}$ (constitué d'un quark s et d'un antiquark $\bar{d}$), un muon et un antimuon. La loi de conservation de l'énergie, avec l'équivalence masse-énergie décrite par la célèbre équation $E=mc^2$ d'Albert Einstein, impose que ces particules finales aient une masse totale inférieure à celle du méson beau initial. La différence de masse se retrouve dans l'énergie cinétique des produits de la désintégration.

DES PARTICULES VIRTUELLES

Concentrons-nous maintenant sur ce qui se passe au cœur des diagrammes, là où se produisent les désintégrations. Dans le premier cas, nous voyons le quark b se transformer en un quark c et émettre un boson W , une des particules médiatrices de l'interaction faible. Ce boson W se désintègre à son tour en un lepton τ et son antineutrino associé. Il est *a priori* étonnant de voir apparaître un boson W , qui est environ 16 fois plus massif que le méson $\bar{B}^0$ de départ. Pourquoi sa présence dans le processus de désintégration ne viole-t-elle pas la loi de conservation de l'énergie? Dans la mécanique contre-intuitive de la mécanique quantique, une telle violation est en fait autorisée tant qu'elle ne dure qu'un court instant, en vertu du principe d'incertitude de Heisenberg. Dans ce cas, nous disons que le boson W est virtuel.

Tournons-nous maintenant vers la désintégration $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$. On constate que le processus est plus compliqué. Il présente une structure en forme de boucle et, outre un boson W , plusieurs autres particules virtuelles participent à la désintégration: un quark t virtuel et un boson Z virtuel, tous deux beaucoup plus massifs que le méson de départ. L'idée de particules virtuelles peut sembler fantaisiste, mais les règles de la physique quantique nous autorisent à établir de tels diagrammes, et les physiciens ont démontré que ces processus sont indispensables pour calculer correctement la probabilité d'occurrence des désintégrations considérées. De fait, c'est par l'influence de quarks t virtuels dans certaines mesures que les physiciens néerlandais Gerard 't Hooft et Martinus Veltman ont estimé, dès 1994, que le quark t avait une

GLOSSAIRE

HADRON

Particule composite constituée de quarks, liés par des gluons.

HADRON BEAU

Hadron contenant au moins un quark b ou un antiquark $\bar{b}$

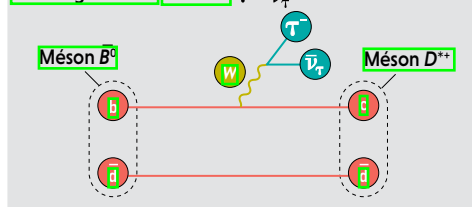
MÉSON

Hadron formé d'un quark et d'un antiquark. Un méson beau est formé d'au moins un quark b ou d'un antiquark $\bar{b}$

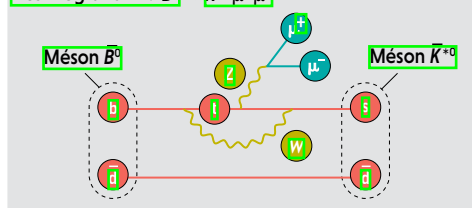
BARYON

Hadron formé de trois quarks. Le proton est ainsi un hadron formé de deux quarks u et d'un quark d .

Désintégration 1: $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$



Désintégration 2: $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$



visualiser et calculer les probabilités de désintégration et d'interaction des particules subatomiques. Nous allons ici examiner les diagrammes de Feynman de deux chaînes de désintégration possibles pour des hadrons beaux (des particules qui, malheureusement, sont en général désignées par des agrégats assez malcommodes de lettres grecques et de symboles).

Dans les deux exemples, nous partons d'une particule particulière, qui peut être produite lors de la collision de deux protons dans

▢ masse comprise entre 145 et 185 GeV. Le quark t a été détecté l'année suivante au Fermilab, aux États-Unis, et sa masse a été établie à 175 GeV.

Les diagrammes que nous avons examinés ne représentent que deux déroulements possibles de ces désintégrations particulières. On peut en imaginer d'autres et, ce qui est extraordinaire, c'est que toutes ces possibilités ont leur importance. D'après les règles de la physique quantique, ce qui se passe dans la nature est imposé par la contribution nette de *toutes* les diagrammes valides que nous puissions dessiner, même si les plus simples et les plus évidents sont ceux qui ont le plus de poids.

Par conséquent, tous les chemins possibles de la désintégration jouent un rôle, et nous devons les prendre en compte dans les calculs effectués pour prédire la probabilité de désintégration, les trajectoires des produits de la désintégration et autres caractéristiques. En d'autres termes, même quand une particule se désintègre selon un processus ne donnant en sortie que des particules membres du modèle standard, elle subit les effets de toutes les particules possibles. Par conséquent, si la mesure d'une désintégration est en désaccord avec nos calculs fondés sur les seuls ingrédients du modèle standard, nous en déduisons qu'il doit y avoir quelque chose d'autre à l'œuvre.

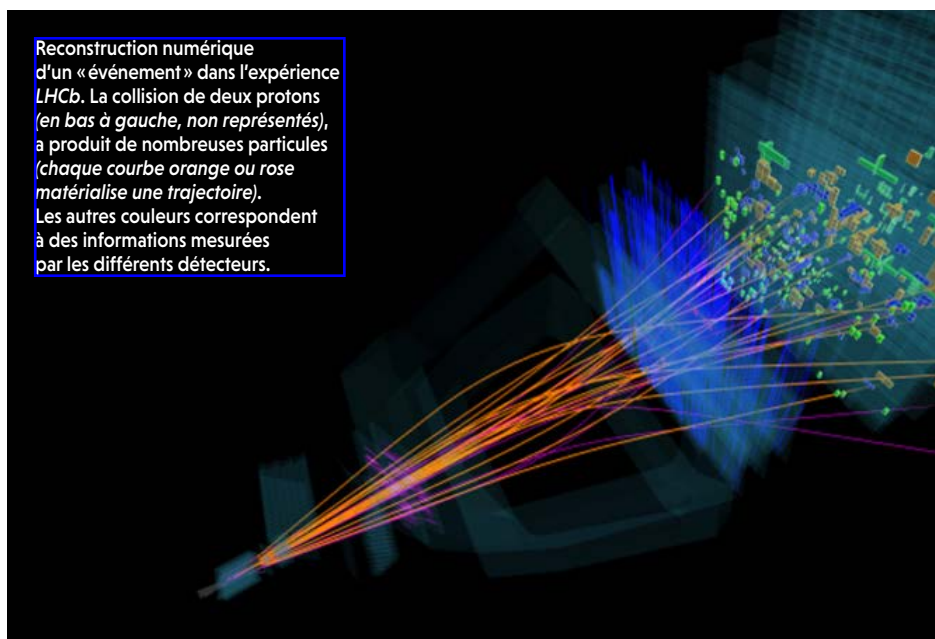
Tel est le principe directeur de la stratégie de recherche indirecte de nouvelles particules et d'une physique nouvelle que nous menons sur *LHCb*. En outre, comme ces particules nouvelles seraient des participantes virtuelles de toutes les désintégrations que nous mesurons, la masse des particules que nous pouvons détecter n'est pas limitée par la capacité énergétique de notre accélérateur. En principe, si nous étudions les bons processus de désintégration avec une précision suffisante, nous pourrions observer les effets de particules encore plus lourdes que celles susceptibles d'être créées et détectées par *Atlas* et *CMS*.

DES FISSURES DANS LE MODÈLE STANDARD

Et, en effet, mes collègues de l'expérience *LHCb* et moi avons déjà mis en évidence des indices suggérant que tout n'est pas parfait dans la description que fait le modèle standard des désintégrations de hadrons beaux. Il est important de souligner qu'avec davantage de données et une meilleure compréhension de la théorie, il n'est pas exclu que nous trouvions que, tout compte fait, le modèle standard est en accord avec nos mesures. Mais même si cela peut être le cas, ces premières indications illustrent comment des fissures pourraient naître et s'élargir dans l'édifice du modèle standard.

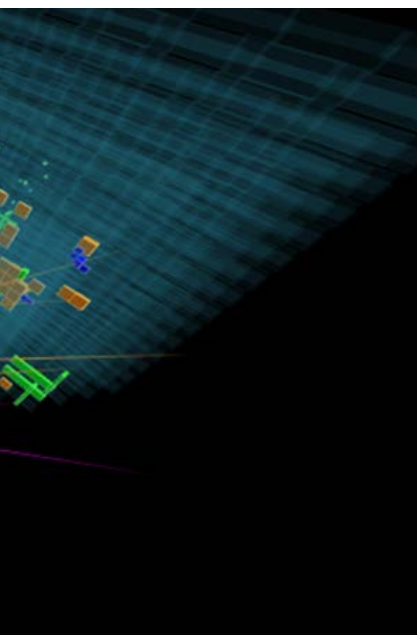
La pièce à conviction numéro un concerne la désintégration $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$ que nous avons

Reconstruction numérique d'un « événement » dans l'expérience *LHCb*. La collision de deux protons (en bas à gauche, non représentés), a produit de nombreuses particules (chaque courbe orange ou rose matérialise une trajectoire). Les autres couleurs correspondent à des informations mesurées par les différents détecteurs.



examinée plus haut (voir les figures page 69) et la possible violation de la règle dite d'universalité des leptons. Dans le modèle standard, le boson W a la même probabilité de se désintégrer en un lepton tau et son antineutrino que de se désintégrer en membres des autres générations, celle des muons ou celle des électrons (après prise en compte des masses différentes du tau, du muon et de l'électron). En d'autres termes, les règles de la désintégration du W devraient être universelles pour tous les leptons. Mais dans les données de *LHCb*, après avoir compté les désintégrations dans chaque génération, soustrait tous les processus qui pourraient contrefaire les signatures de ces désintégrations et intégré diverses corrections liées aux détecteurs, nous avons trouvé que les hadrons beaux semblent se désintégrer en taus plus souvent que le modèle standard ne le prévoit.

Nos résultats ne sont pas encore définitifs; le désaccord que nous avons trouvé est « à 2σ », σ (sigma) désignant l'écart-type, une grandeur statistique qui mesure la dispersion des valeurs mesurées par rapport à leur moyenne. Un écart entre une valeur mesurée et la valeur prévue peut être le résultat d'un phénomène nouveau non inclus dans la théorie ou la conséquence de fluctuations statistiques. Du fait de ces dernières, il n'est donc pas rare d'observer des écarts de 2σ . L'accumulation de données permet en général d'éliminer ces effets. Dès lors, les physiciens ne commencent vraiment à réagir que quand ils sont confrontés à des écarts de 3σ . On considère qu'il faut avoir une déviation de 5σ pour être confiant que l'effet n'est pas un artefact statistique et qu'il s'agit bien d'une découverte. Notre effet à 2σ n'a donc rien de remarquable... sauf si l'on prend en compte ce que les physiciens ont trouvé dans d'autres expériences.



D'autres équipes ont cherché des violations de l'universalité des leptons avec *BaBar* et *Belle*, deux expériences de physique des hadrons beaux conduites respectivement en Californie et au Japon. Ces chercheurs ont aussi mis en évidence une préférence pour les taus dans les mêmes désintégrations que celles que nous avons mesurées, ainsi que dans des processus similaires. De plus, sur *LHCb*, nous avons réalisé début 2017 une nouvelle mesure de l'universalité des leptons dans ces désintégrations en utilisant une technique différente, et nous avons encore trouvé que les taus sont légèrement plus nombreux que ne le prédit le modèle standard. En regroupant les données de toutes ces expériences, les mesures livrent un résultat s'écartant de 4σ des prédictions classiques. C'est actuellement l'un des désaccords les plus forts de la physique des particules, ce qui constitue un problème réel pour le modèle standard.

Comment expliquer ces observations? Les théoriciens ont quelques idées. Par exemple, l'existence d'un nouveau type de boson de Higgs, doté d'une charge électrique, pourrait être une piste, car de telles particules ne respectent pas l'universalité des leptons. Elles se désintègrent de préférence en particules de masse assez élevée, favorisant donc la production de leptons taus. Mais les théories les plus simples qui prédisent des bosons de Higgs supplémentaires reproduisent assez mal les détails

années à venir, grâce à *LHCb* ou à l'expérience de nouvelle génération *Belle II*, qui sera bientôt opérationnelle.

Un autre exemple pointant peut-être vers une physique au-delà du modèle standard concerne la désintégration $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$, que nous avons déjà évoquée (voir figure page 69). Il est naturel de rechercher d'éventuelles manifestations d'une physique nouvelle dans les processus de ce type, pour deux raisons. Tout d'abord, la présence de boucles dans le diagramme de Feynman correspondant indique que la désintégration dans le cadre du modèle standard est difficile. En revanche, des particules nouvelles pourraient faciliter cette désintégration. Il y aurait alors davantage de désintégrations que ne le prévoient les calculs fondés sur le modèle standard. En second lieu, cette désintégration a de nombreuses propriétés mesurables: la probabilité d'occurrence du processus, les angles et les énergies des produits de désintégration, etc. De ces propriétés, on tire différentes «observables», des quantités que nous pouvons comparer directement avec les prédictions du modèle standard.

UNE TRAQUE MINUTIEUSE

À bien des égards, $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$ est la réaction vedette de la physique des hadrons beaux, et ses mérites sont évidents quand on voit l'impressionnant corpus d'articles théoriques produits avant même la mise en route du LHC. La seule chose qui fasse défaut à cette désintégration est une nomenclature à la hauteur: les noms utilisés jusqu'à présent pour les différentes observables laissent franchement à désirer, par exemple « P_5' » (prononcé «p5 prime») qui est le «héros» de notre histoire.

Nous avons fait une première analyse de P_5' avec une partie des premières données de *LHCb*. Nous avons mesuré cette observable en définissant plusieurs catégories à partir des énergies et des directions de la paire de muons produite dans le processus. Pour certaines catégories, nous avons trouvé un désaccord significatif entre les prédictions et nos mesures. Nous étions donc impatients de réaliser l'analyse avec le jeu de données complet de la première campagne de mesures du LHC. Le désaccord persistait-il, ou bien s'agissait-il simplement d'une aberration statistique?

Il a persisté: la taille de l'effet est désormais aux alentours de $3,5\sigma$, ce qui est trop peu pour tirer des conclusions définitives et déboucher le champagne, mais certainement suffisant pour être pris au sérieux. En outre, nous avons trouvé d'autres signaux encourageants en étudiant des observables dans des processus de désintégration similaires. Ces observables présentent aussi de curieux désaccords avec le modèle standard. Globalement, ce désaccord

Ces désaccords entre mesures et théorie sont parmi les plus forts en physique des particules

des désaccords entre nos mesures et le modèle standard. Une autre explication encore plus exotique serait l'existence d'un leptoquark, une particule hypothétique qui partage certaines propriétés des quarks et des leptons.

Enfin, bien sûr, les résultats que nous observons relèvent peut-être d'un effet expérimental lié à un signal mal compris qui aurait la même allure que les désintégrations que nous recherchons. Pour faire le tri entre ces possibilités, de nouvelles mesures plus précises sont nécessaires. Nous en disposerons dans les

▷ atteint $4,5\sigma$: il semble ainsi que l'on ne puisse plus ignorer le problème.

Les théoriciens ont proposé une foule d'explications potentielles mettant en œuvre une physique nouvelle pour expliquer cet effet. Le leptiquark, déjà invoqué pour la désintégration $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$, est une possibilité. Une autre serait une particule Z' («Z prime»), qui serait un cousin exotique plus lourd du boson Z, mais qui se désintégrerait de façon spécifique en quarks ou en leptons (voir les figures ci-contre). Néanmoins, ces spéculations sont soumises à de fortes contraintes. Elles doivent s'accorder avec toutes les mesures réalisées dans les autres expériences du LHC ou ailleurs. Par exemple, la masse et le comportement de ces nouvelles particules hypothétiques doivent être compatibles avec le fait qu'elles n'aient pas été détectées dans les recherches directes d'Atlas et de CMS.

Pour certains physiciens, le problème trouverait sa source dans nos calculs issus du modèle standard. Par exemple, les répercussions d'effets bien connus mais difficiles à calculer et associés à l'interaction forte pourraient être plus importantes qu'on ne le pensait initialement. La bonne nouvelle est qu'il est possible de tester ces effets par des mesures complémentaires. Ces tests nécessiteront une analyse détaillée et davantage de données, que nous collectons déjà au LHC et ailleurs.

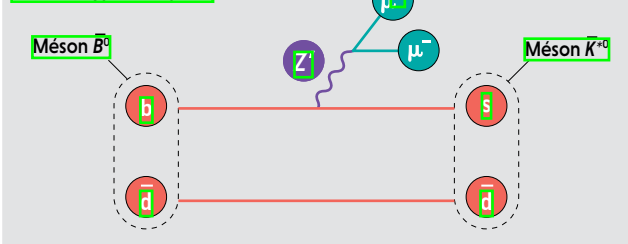
LES INDICES S'ACCUMULENT

La dernière énigme que *LHCb* a fait surgir concerne un double jeu de mesures qui n'est pas sans rapport avec nos deux exemples précédents. Elle pourrait cependant mettre en évidence un effet encore plus intéressant. Ici, nous avons étudié un rapport, noté R_{K^*} , (et prononcé «r k étoile»), qui compare la probabilité du processus $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$ à la probabilité d'une désintégration similaire qui produit un électron et un positron (l'antiélectron) à la place de la paire $\mu^+ \mu^-$ de muons. Nous avons également étudié un deuxième rapport, R_K , qui compare les désintégrations où le méson $\bar{K}^{*0}$ a été remplacé par un autre type de hadron (contenant un quark s) nommé tout simplement méson K. Dans ces deux cas, nous essayons encore de tester l'universalité des leptons, mais cette fois entre les deux premières générations de leptons, à savoir électrons et muons.

La prédiction du modèle standard est triviale : les deux désintégrations de chaque rapport devraient se produire avec la même probabilité, en conséquence de quoi les valeurs attendues de R_K et R_{K^*} devraient être pratiquement égales à 1. Là encore, nous nous attendions à ce que l'universalité des leptons soit vérifiée. Les mesures, bien que loin d'être simples, présentent moins de difficultés

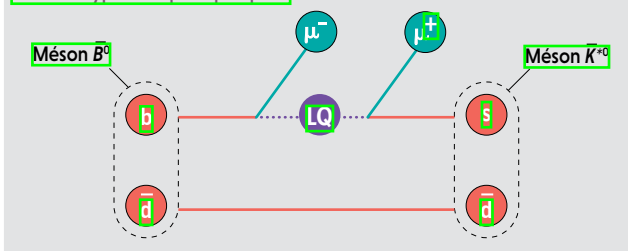
Désintégration 2A : $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$

Avec un hypothétique Z



Désintégration 2B : $\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \mu^+ \mu^-$

Avec un hypothétique leptiquark



expérimentales que les analyses précédentes sur l'universalité des leptons ; elles constituent donc un test extrêmement clair du modèle standard.

Nous avons commencé par l'analyse de R_K et avons trouvé une valeur basse, 0,75, avec une précision qui la place à $2,6\sigma$ des prédictions du modèle standard. Cet écart était suffisamment étonnant pour que nous attendions avec impatience la valeur de R_{K^*} . Nous l'avons publiée récemment et nous n'avons pas été déçus : R_{K^*} présentait un comportement remarquablement identique à R_K , avec un rapport égal à 0,69 (à environ $2,6\sigma$ au-dessous de la prédiction du modèle standard). Même s'il n'est pas exclu que ces valeurs plus basses qu'attendu soient dues à de simples fluctuations statistiques, le fait que nous les ayons trouvées dans deux mesures différentes attire l'attention.

Si les mesures de R_K et R_{K^*} sont confirmées, elles indiquent que quelque chose dans la nature favorise les désintégrations qui produisent des électrons plutôt que celles qui créent des muons, et là encore les leptiquarks ou un boson Z' sont des coupables possibles. Si c'est le cas, quel que soit le mécanisme responsable, il n'expliquerait pas seulement les bizarreries de R_K et R_{K^*} , mais aussi la mesure de P_s' relative aux muons. Pour faire bonne mesure, certains théoriciens plus ambitieux ont même proposé des scénarios qui résoudraient également l'énigme $\bar{B}^0 \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$, mais concevoir une particule ayant les caractéristiques requises pour expliquer les trois mesures est un défi de taille.

Nous en saurons très bientôt davantage. Nous analysons actuellement les données

BIBLIOGRAPHIE

F. Archilli et al., **Flavour-changing neutral currents making and breaking the standard model**, *Nature*, vol. 546, pp. 221-226, 2017.

G. Ciezarek et al., **A challenge to lepton universality in B-meson decays**, *Nature*, vol. 546, pp. 227-233, 2017

G. Kane, **Le modèle standard revisité**, *Pour la Science*, n° 311, septembre 2003.

produites lors de la seconde campagne du LHC. Notre connaissance des valeurs de R_K et R_{K^*} pourrait très vite s'améliorer. Soit l'importance des désaccords augmentera, et ces anomalies passeront sur le devant de la scène de la physique actuelle. Soit ces anomalies se révéleront dues aux fluctuations statistiques, et il nous restera à rechercher la nouvelle physique dans d'autres processus.

ATTENDRE PRUDEMMENT LA SUITE

Les résultats dont nous avons fait état ici ne sont que les exemples les plus saillants d'une multitude de mesures intéressantes ayant émergé récemment dans le domaine des hadrons beaux. Ils suscitent à juste titre beaucoup d'enthousiasme parmi les physiciens des particules, mais les plus vieux et sages d'entre nous ont déjà vu dans le passé de tels engouements surgir puis s'évanouir. Attendons donc prudemment la suite.

Quelles seraient les implications si une ou plusieurs de ces anomalies passaient de la catégorie « indice très intéressant » à « contradiction claire du modèle standard » ? Sans aucun doute, ce serait l'un des développements les plus importants en physique des particules depuis plusieurs décennies. Une fenêtre

s'ouvrirait sur le paysage qui se cache au-delà des limites du modèle standard et de ce que nous comprenons des lois régissant l'Univers. Dans un premier temps, il faudrait alors découvrir ce qui est responsable des désaccords avec le modèle standard. S'il s'agit de l'influence virtuelle de particules de la nouvelle physique (qu'il s'agisse d'un boson de Higgs exotique, d'un leptoquark, d'un Z' ou d'autre chose encore), leurs effets devraient apparaître dans d'autres désintégrations de hadrons beaux et nous livrer des indices supplémentaires. En outre, à moins d'être très lourdes, ces nouvelles particules pourraient également apparaître directement dans des collisions d'*Atlas* ou *CMS*, ou dans un futur accélérateur de plus haute énergie encore.

Sans savoir ce que l'avenir nous réserve, l'extrême sensibilité du LHC et les perspectives de progrès considérables dans les années à venir sont encourageantes. Nous ignorons si le chemin vers la nouvelle physique par des recherches indirectes sera court ou long, mais la plupart d'entre nous sont persuadés d'aller dans la bonne direction. C'est, dit-on, Galilée qui aurait préconisé de « mesurer ce qui est mesurable, et rendre mesurable ce qui ne l'est pas ». Il n'y a pas meilleure devise pour l'expérience *LHCb*. ■



{ Partagez
les savoirs }

**LES
RENDEZ-
VOUS DU
MUSÉUM**

Entrée
gratuite

**Au Jardin
des Plantes**

Détails sur mnhn.fr,
rubrique :
"les rendez-vous du Muséum"

POUR LA
SCIENCE

CONFÉRENCES-DÉBATS

Les roches terrestres et les météorites : jeux de miroir

Lundi 5 mars - 18h : À la recherche des plus anciennes traces du vivant sur Terre et ailleurs
Avec *S. Bernard*, géochimiste et minéralogiste (IMPMC), CNRS et Muséum

UNE EXPO, DES DÉBATS

Animé par *M.-O. Monchicourt*, journaliste scientifique à France Info

Lundi 12 mars - 18h : **Exploration spatiale**
Avec *J.-P. Bibring*, astrophysicien, coordinateur des Programmes d'Exploration de la planète Mars, Institut d'astrophysique spatiale ; *F. Rocard*, responsable des programmes d'exploitation du système solaire, CNES et *V. Sautter*, géologue, spécialiste des roches martiennes, CNRS

UN CHERCHEUR, UN LIVRE

Lundi 19 mars - 18h : **Les météorites et leurs secrets**, Ed. Ellipses
De et présenté par *E. Jacquet*, cosmochimiste

Lundi 26 mars - 18h : **Impacts, des météores aux cratères**, Ed. Belin
Collectif sous la direction de *S. Bouley*, présenté par *S. Bouley*, planétologue, Geosciences Paris Sud et *B. Zanda*, météoritologue, Muséum, co-directrice de l'ouvrage

MÉTIER DU MUSÉUM

Dimanche 25 mars - 15h : **Minéralogiste naturaliste**
avec *P.-J. Chiappero*

Auditorium de la Grande Galerie de l'Évolution
36 rue Geoffroy St-Hilaire, Paris 5^e



L'ESSENTIEL

> En 2017, un vieux télescope est redécouvert lors de l'inventaire des collections patrimoniales de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles de la Ville de Paris (ESPCI).

> Il s'agit d'un télescope dit pyrhéliométrique, conçu

en 1906 par un professeur de l'école, Charles Féry.

> Cet instrument très particulier permet à l'astronome Gaston Millochau de fournir une très bonne estimation de la température à la surface du Soleil... depuis le sommet du mont Blanc.

LES AUTEURS



GUILLAUME DUREY
doctorant en physique
de la matière molle
à l'ESPCI Paris



**ANDRÉ PIERRE
LEGRAND**
professeur émérite
à l'ESPCI Paris



DENIS BEAUDOUIN
auteur,
petit-neveu de
Charles Beaudouin

Le télescope oublié de Charles Féry

Un télescope récemment retrouvé dans les greniers de l'ESPCI, une école d'ingénieurs de Paris, s'est révélé un acteur clé, au début du ^{xx}e siècle, d'une aventure qui occupait les savants depuis plusieurs siècles : la mesure de la température du Soleil.

Paris, mars 2017. À la veille d'importants travaux de rénovation de l'École supérieure de physique et de chimie industrielles (ESPCI), nous poursuivons l'inventaire de son patrimoine scientifique, d'étagères poussiéreuses en placards oubliés. Fondée en 1882 sur la montagne Sainte-Geneviève, l'école a amassé au fil des années des instruments de toutes tailles, de toutes formes. Nous identifions au mieux leurs fonctions, leurs principes, leurs dates de fabrication, leurs constructeurs, mais quelques-uns restent réfractaires aux investigations. L'un d'eux frappe particulièrement notre curiosité : c'est un long tube équipé de plusieurs accessoires, en particulier de deux bornes électriques. Il ressemble à un télescope d'environ 1 mètre de long et 12 centimètres de diamètre et, sur la collerette d'entrée de la lumière, on déchiffre sous la poussière du ^{xx}e siècle :

«Télescope pyrhéliométrique Ch. Féry
Ch. Beaudouin Constructeur Paris»

Découverte notable, car c'est avec cet instrument, reposant sur un procédé mis au point par le physicien Charles Féry, que l'astronome Gaston Millochau mesura en 1906 avec une précision remarquable la température de la surface solaire depuis l'observatoire Janssen, au sommet du mont Blanc : «5663° absolus, soit environ 5400° vulgaires», selon l'expression de Millochau. Une erreur qui ne diffère que de 2% de la valeur moderne, 5778 kelvins.

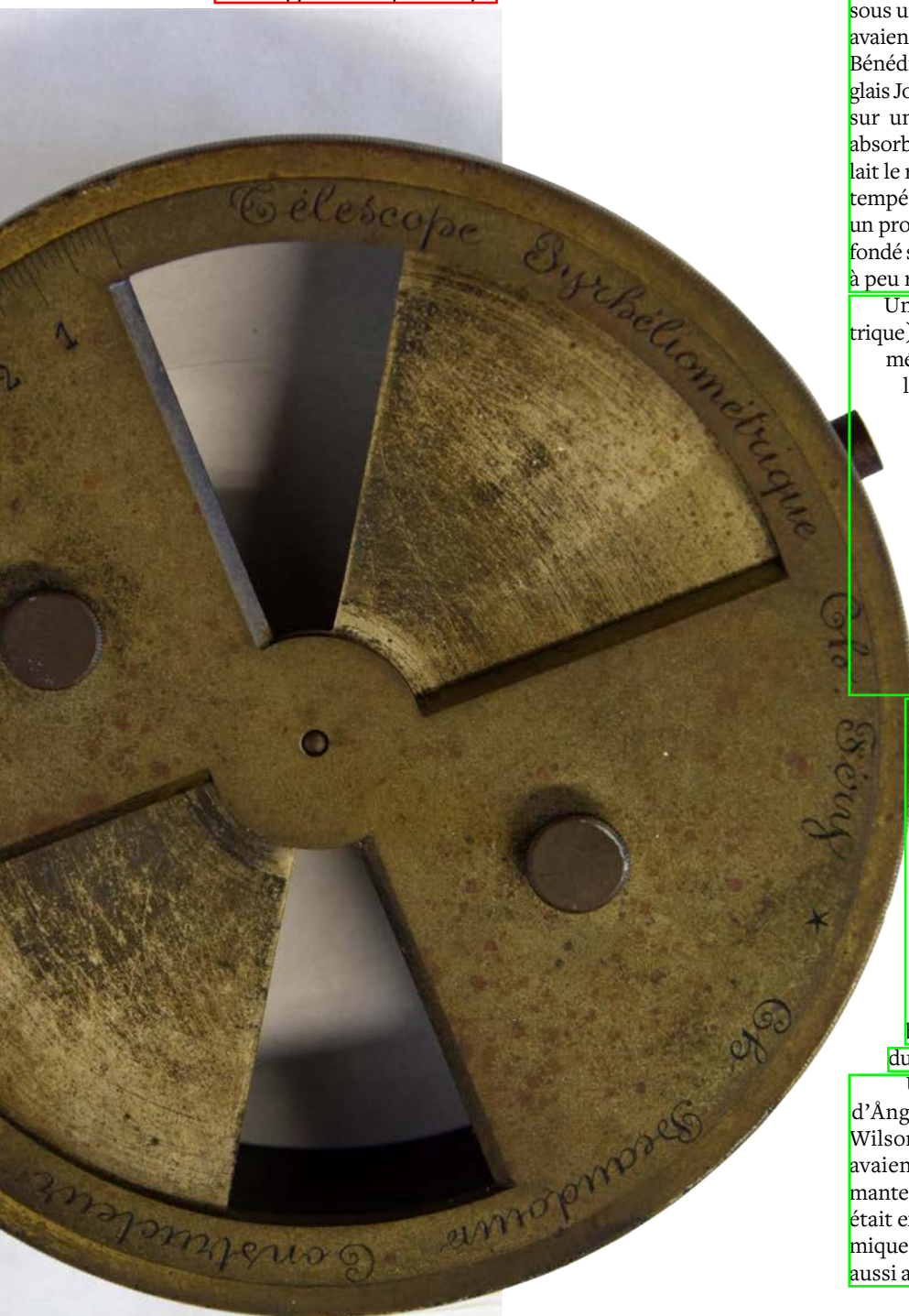
MESURER LA TEMPÉRATURE DU SOLEIL

Ce n'était pas la première fois qu'une telle mesure était effectuée. L'histoire de l'actinométrie solaire – l'étude des rayonnements issus du Soleil – était même déjà assez longue, mais les mesures restaient peu précises. Aux

© Guillaume Durey



Sur le diaphragme papillon du télescope retrouvé, une inscription apparut sous la poussière : «Télescope pyrhéliométrique Ch. Féry».



expériences rudimentaires d'Isaac Newton (il avait estimé la chaleur reçue du Soleil à partir d'une température mesurée à l'aide de thermomètres glissés sous une couche de terre sèche exposée au Soleil) avaient succédé les travaux du Genevois Horace-Bénédict de Saussure en 1767, puis ceux de l'Anglais John Herschel en 1824. Ces travaux reposaient sur un principe calorimétrique : un corps très absorbant, de capacité thermique connue, recueillait le rayonnement. En mesurant l'élévation de sa température, on en déduisait l'énergie reçue. Puis un procédé plus performant dit de compensation, fondé sur l'utilisation d'un thermocouple, avait peu à peu remplacé cette méthode.

Un thermocouple (ou couple thermoélectrique) est un circuit conducteur constitué de deux métaux différents reliés par deux soudures. Si l'une des soudures est portée à une température différente de l'autre, il apparaît une différence de potentiel dans le circuit, et donc un courant. Ce phénomène, découvert en 1821 par le physicien allemand Thomas Seebeck, est utilisé pour mesurer des températures. En pratique, on porte une soudure à la température à mesurer, tandis que les deux autres extrémités des métaux sont reliées aux fils d'un voltmètre et portées à une même température de référence.

En 1893, s'appuyant sur ce phénomène, le physicien suédois Knut Ångström avait construit un «pyrhéliomètre électrique à compensation» pour mesurer la température de la surface solaire : l'une des soudures était exposée au Soleil, ce qui produisait un courant électrique, tandis que la seconde était parcourue par un courant dont on faisait varier l'intensité, ce qui avait pour effet de chauffer la soudure (par effet Joule). Ångström cherchait alors à équilibrer les deux courants pour que les deux soudures reçoivent la même énergie.

Un an plus tard, s'inspirant des travaux d'Ångström, l'astronome irlandais William Wilson et son confrère britannique Peter Gray avaient mis au point une version plus performante encore de l'appareil, où la seconde soudure était exposée au rayonnement d'une source thermique artificielle d'intensité connue. Wilson avait aussi appliqué à leurs mesures une loi découverte

expérimentalement quelques années plus tôt, en 1879, par le physicien slovène Jožef Stefan et justifiée en 1884 par Ludwig Boltzmann dans le cadre de la thermodynamique – la loi de Stefan-Boltzmann.

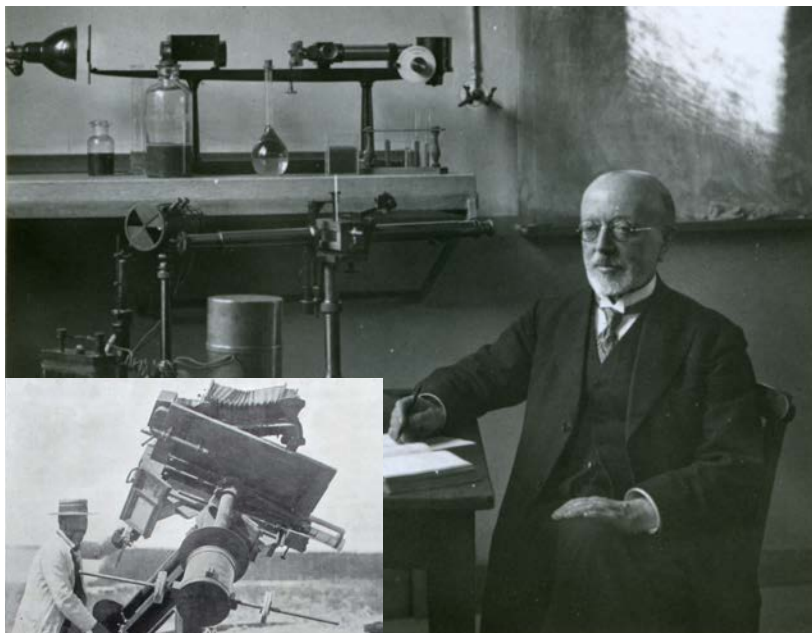
Cette loi établit que la puissance totale rayonnée par un corps noir de température absolue T est proportionnelle à T^4 . Un corps noir est un objet physique idéal qui absorbe tout le rayonnement électromagnétique qu'il reçoit, sans en réfléchir ni en transmettre. À l'équilibre, il rayonne : sa température ne reste constante et uniforme que si toute l'énergie qu'il absorbe est réémise. Or le Soleil, comme toutes les étoiles, est une bonne approximation d'un corps noir. Grâce à la loi de Stefan-Boltzmann, Wilson était donc capable de déduire la température du Soleil de l'énergie mesurée avec son appareil.

En toute rigueur, cependant, la température obtenue avec cette méthode est dite apparente : c'est celle qu'aurait un corps noir placé à la même distance que le Soleil, de même diamètre apparent et produisant un rayonnement de même intensité. Wilson n'évaluait pas, notamment, l'effet de l'absorption dû aux atmosphères de la Terre et du Soleil. Il avait donc obtenu une série de valeurs assez dispersées, allant de 5773 à 6863 kelvins. L'instrument de Féry et Millochau apporta alors une importante brique à l'édifice. Inspiré tant des rapides progrès instrumentaux que des dernières avancées théoriques, il fournit en 1906 une mesure bien plus précise de la température de la surface solaire.

UN PYROMÈTRE AUX FOURNEAUX

Âgé de 41 ans, Féry était alors professeur d'optique à l'ESPCI, dont il était diplômé de la première promotion. Passionné de physique, d'optique, de photographie, d'astronomie, il savait marier la recherche fondamentale à ses applications. Il avait déjà breveté et construit plusieurs instruments scientifiques pour la recherche et l'industrie, principalement dans quatre domaines : l'étude des propriétés physiques des substances chimiques (réfractométrie, spectrographie), l'étude du rayonnement (actinométrie, calorimétrie, pyrométrie), les piles et accumulateurs pour la TSF, et l'horlogerie électrique.

C'est l'instrument qu'il avait fabriqué durant sa thèse de physique, quelques années plus tôt, qui le conduisit à s'intéresser à l'actinométrie solaire. L'objectif de cette thèse, soutenue en 1902, était de mesurer le rendement lumineux de certains mélanges d'oxydes de terres rares utilisés dans l'éclairage au gaz, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie lumineuse, qui éclaire, et l'énergie calorifique, qui chauffe. Pour ce faire, Féry avait trouvé un moyen d'évaluer l'énergie lumineuse de la source (en la comparant avec



FÉRY ET MILLOCHAU

Sans la rencontre de Charles Féry (ci-dessus dans son laboratoire à l'ESPCI) et de Gaston Millochau (à gauche observant l'éclipse de Soleil du 28 mai 1900 à Argamasilla, en Espagne), le télescope pyrhéliométrique de Féry n'aurait peut-être jamais vu le jour.



celle, connue, émise par une lampe incandescente), mais il lui manquait un appareil qui mesurerait son énergie calorifique. Parmi les diverses techniques disponibles à l'époque, il choisit d'utiliser un thermocouple très particulier, optimisé par ses soins : « La quantité de chaleur transmise par rayonnement est généralement très faible ; on a donc le plus grand intérêt à diminuer le plus possible la masse du corps thermométrique, pour que celui-ci prenne rapidement sa température d'équilibre. »

Concrètement, son thermocouple repose sur deux fils métalliques se croisant en leur centre, ce dernier formant la soudure chaude (voir l'encadré page 78). Et pour éviter les transferts parasites de chaleur, Féry a eu l'idée d'enfermer la soudure chaude au centre d'une cavité qui constitue la soudure froide : « Dans ces conditions, explique-t-il, un rayonnement latéral produit une élévation simultanée de la température des deux soudures. »

Cette lunette fournit au physicien les mesures qui lui permirent d'élaborer une théorie du rayonnement des oxydes. Mais sa thèse n'était pas encore achevée qu'il pensait déjà aux applications qu'un tel prototype aurait dans le monde industriel. C'est ainsi que son pyromètre devint le premier appareil commercial utilisant le rayonnement du corps noir pour mesurer une température. Jusqu'alors, on mesurait la température des fourneaux d'usine à l'aide de

thermomètres, qui s'endommageaient vite, ou de pyromètres optiques, dont la précision dépendait de la sensibilité de l'œil de l'observateur. Or il se trouve que les fours industriels sont parmi les meilleures réalisations expérimentales du concept de corps noir. On ménage une très petite ouverture dans un four par ailleurs fermé et, connaissant la valeur de l'énergie rayonnée par le four au moyen d'une mesure à la lunette pyrométrique, on en déduit sa température en appliquant la loi de Stefan-Boltzmann, corrigée de l'absorption dans l'objectif de la lunette.

Le modèle industriel du pyromètre de Féry permit d'évaluer des températures de 800 °C à 1800 °C, avec une précision de ± 5 °C au-dessus de 1700 °C. En 1904, Féry l'améliora encore en le transformant en un télescope pyrométrique, plus sensible: à l'inverse de la réfraction dans une lentille, la réflexion sur un miroir concave n'introduit quasiment aucune absorption. Un millier d'exemplaires furent produits par plusieurs constructeurs.

C'est dans ce contexte qu'en 1906 se rencontrèrent Féry et Millochau. Ce dernier était un astronome contemporain de la naissance de l'astrophysique et observateur de talent. Collaborateur proche de Jules Janssen, le fondateur de l'observatoire de Meudon, il menait

LES TRÉSORS DE L'ESPCI

Depuis 2017, une commission menée par Brigitte Leridon procède à un inventaire des instruments scientifiques anciens de l'ESPCI Paris, le dernier, partiel, ayant été réalisé il y a dix ans. À ce jour ont été référencés plus de 500 objets d'intérêt, autant de témoins du riche passé d'une école vieille de 136 ans, ayant notamment abrité les travaux de Pierre et Marie Curie, et de Paul Langevin.

aux rayons du Soleil, corrigée de l'effet absorbant de l'atmosphère terrestre. La fabrication du pyréliomètre fut confiée à Charles Beaudouin, constructeur d'instruments scientifiques installé depuis 1903 non loin de l'ESPCI, qui bénéficia très tôt des commandes de Féry, lequel appréciait ses qualités de mécanicien et d'électricien.

Millochau utilisa le télescope pyréliométrique de Féry au cours de deux missions... au sommet du mont Blanc. En effet, Janssen, qui cherchait à déterminer la composition de l'atmosphère du Soleil, avait fait construire quelques années auparavant, en 1893, un observatoire au sommet du mont afin de réduire l'effet de l'atmosphère terrestre sur ses mesures. La première expédition de Millochau eut lieu en 1906:

«Après une série d'observations à Chamonix, je partis le 20 juillet. [...] Une série de mauvais temps s'étant produite, le pyréliomètre ne put être monté par les porteurs que le 29 juillet, et les observations furent immédiatement commencées. Les meilleures conditions atmosphériques furent réalisées le 2 août. [...] Vers sept heures, le ciel commença à s'éclaircir et resta d'une pureté remarquable jusqu'à la nuit. [...] La courbe journalière obtenue ce jour-là, en mesurant d'heure en heure la radiation du centre solaire, est très régulière et extrêmement intéressante.»



des recherches sur les spectres des planètes et du Soleil. En 1906, il se consacrait à l'étude du Soleil. La paternité de l'idée n'est pas claire, les deux savants donnant des versions contradictoires. Toujours est-il que Féry fit réaliser un prototype de télescope pyrométrique pour la recherche en actinométrie solaire.

Selon Millochau, leur objectif était double: d'une part, obtenir une mesure précise de la température de la surface solaire et, d'autre part, mesurer ce que l'on appelle la constante solaire – la quantité de chaleur que reçoit par minute une surface noire d'un centimètre carré soumise

L'OBSERVATOIRE JANSSEN

Inauguré en 1893, l'observatoire que fit construire l'astronome Jules Janssen au sommet du mont Blanc était alors le plus haut du monde. Outre Millochau et le télescope Féry, il accueillait environ 25 chercheurs à l'occasion d'une cinquantaine de missions, avant d'être englouti dans une crevasse en 1909.

AU SOMMET DU MONT BLANC

Durant les treize jours de cette mission, Millochau conduisit deux expériences avec le pyréliomètre. La première consistait à quantifier l'effet de l'absorption par l'atmosphère terrestre. L'astronome supposa qu'elle suivait la loi de Beer-Lambert, qui énonce que l'intensité d'un rayonnement décroît exponentiellement avec la distance parcourue dans un milieu absorbant. En réalisant une série de pointés du centre du Soleil au cours d'une journée, pour différentes hauteurs de l'astre sur l'horizon, et donc différentes épaisseurs d'atmosphère terrestre traversées par son rayonnement, il déduisit que cette dernière absorbait 11% du rayonnement initial au sommet du mont Blanc.

La seconde expérience consistait à obtenir un profil d'intensité du rayonnement le long d'un diamètre solaire. Pour ce faire, le pyréliomètre fut orienté vers un point juste en avant du Soleil de midi et laissé immobile; alors que la Terre tournait autour de son axe, l'image du Soleil traversait le champ de vision de l'instrument. En prenant des points de mesure régulièrement espacés dans le temps, Millochau obtint jusqu'à 16 valeurs le long d'un diamètre du Soleil.

L'astronome salua la symétrie de la courbe ainsi obtenue, qu'il attribua à la qualité de l'instrument de Féry. Son inertie thermique étant très faible, l'appareil était capable de reproduire instantanément les variations temporelles de l'énergie solaire. En revanche, il regretta d'avoir dû tracer la courbe point par point: «En employant >

Un galvanomètre enregistreur spécialement aménagé, on aurait une courbe continue. Nous n'avons pu réaliser ce dispositif trop coûteux pour nos ressources.»

Millochau nota aussi que l'aiguille du galvanomètre relié au pyrhéliomètre pour mesurer le courant induit par le rayonnement solaire ne redescendait pas à zéro quand on visait une zone proche du Soleil. Il attribua ce phénomène à «une émission calorifique extérieure à l'image solaire»: il détectait vraisemblablement les

effets des rayonnements infrarouges qu'émet la chromosphère solaire. Enfin, cette succession de mesures en différents points du disque permit d'estimer l'absorption par l'atmosphère solaire, en appliquant la même méthode que pour l'atmosphère terrestre.

Millochau réalisa ces deux expériences en quatre lieux: le sommet du mont Blanc (4810 mètres), Chamonix (1000 mètres), le refuge des Grands Mulets (3050 mètres) et, une fois de retour, à l'observatoire de Meudon (150 mètres). Comparant la qualité des différents sites, il fit valoir l'intérêt de l'observatoire Janssen, au sommet du mont Blanc, où les conditions atmosphériques étaient très stables au cours de la journée, particulièrement en termes de convection et d'hygrométrie. Millochau envisagea même une façon encore plus audacieuse d'obtenir de meilleurs résultats: «Un sondage vertical de l'atmosphère, en ballon, où je crois possible d'utiliser le télescope pyrhéliométrique, donnerait certainement de précieuses indications sur les effets de l'absorption de l'atmosphère terrestre.»

LE TÉLESCOPE DE FÉRY



Le pyrhéliomètre de Charles Féry (ci-contre après restauration) est un télescope Newton de 103 mm de diamètre et de 800 mm

de focale. Au foyer du miroir se trouve un thermocouple constitué de deux fils très fins de deux métaux ayant un fort pouvoir thermoélectrique, le fer et le constantan, un alliage de nickel et de cuivre. La jonction entre les deux fils constitue la soudure chaude du thermocouple. Le corps du télescope forme la soudure froide. Un prisme à réflexion totale placé derrière le thermocouple renvoie le faisceau dans un oculaire latéral fixé sur une glissière à molette. Une fois le pointage et la mise au point effectués, on y observe la superposition de la soudure chaude du thermocouple (de diamètre 0,5 mm), et de l'image du Soleil (8 mm). Là où les précédents actinomètres recueillaient passivement les rayons du Soleil, mesurant des valeurs moyennées sur l'ensemble de la surface solaire, le pyrhéliomètre Féry focalise donc ces rayons, permettant ainsi jusqu'à 16 points de mesure de la température le long d'un diamètre solaire. Enfin, le courant produit par le thermocouple est mesuré avec un galvanomètre de grande précision. Pour éviter un échauffement et donc un courant trop élevés, le télescope est muni d'un diaphragme en forme de papillon qui limite la fraction du rayonnement solaire atteignant le thermocouple.

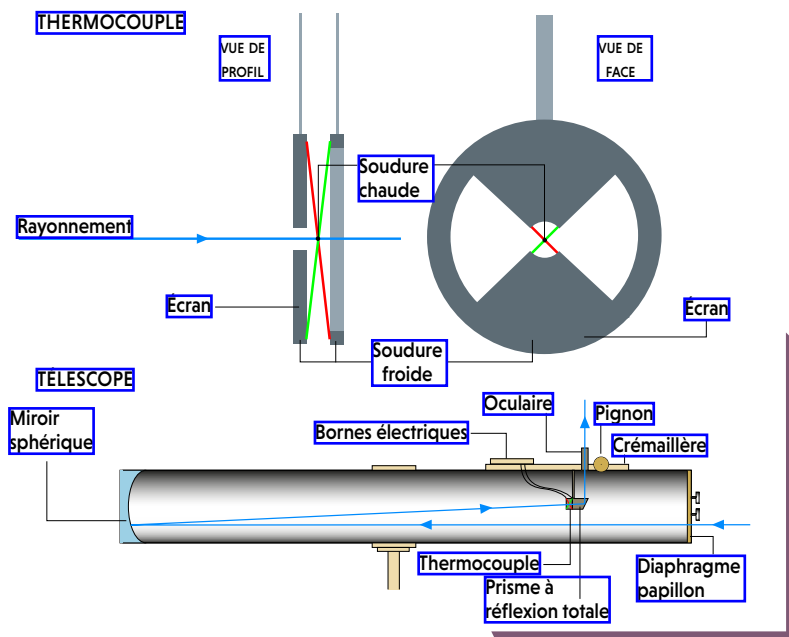
BRIGITTE LERIDON

chercheuse CNRS en physique du solide à l'ESPCI Paris

UNE MESURE DIRECTE DE LA CONSTANTE SOLAIRE

Puis Millochau confia le pyrhéliomètre à Féry, à l'ESPCI, afin de procéder à l'étalonnage de l'appareil et de corréliser les déviations du galvanomètre aux températures apparentes. Un four électrique à résistance de platine chauffé à une température connue servit d'étalon pour interpréter les résultats finaux des observations: la température apparente de la surface solaire ainsi mesurée était de 5 663 kelvins, soit environ 5 400 °C. La déviation étant mesurée sur un galvanomètre précis à 1%, correspondant à une précision de 0,25% sur la température, les deux savants conclurent que l'incertitude sur leur mesure était $\pm 15^\circ\text{C}$. L'ensemble des résultats fut alors annoncé dans une série de trois communications à l'Académie des sciences, présentées par Janssen.

Mais l'aventure du pyrhéliomètre ne s'arrêta pas là, car il remonta au sommet du mont Blanc l'été suivant pour une seconde campagne d'observations. En effet, Féry et Millochau n'avaient pas encore déterminé la constante solaire. Toutefois, le pyrhéliomètre seul ne pouvait fournir ce résultat: l'expression de la constante solaire, calculée en sommant les contributions des différents points mesurés sur le disque solaire, fait apparaître un coefficient indéterminé. Néanmoins, la faible inertie thermique de l'instrument le rendait capable de fournir des mesures beaucoup plus rapidement que la plupart des actinomètres, appareils alors utilisés pour la mesure de la constante solaire. Les deux savants imaginèrent donc une méthode pour convertir le pyrhéliomètre en un «actinomètre instantané».



UNE MINUTIEUSE RESTAURATION DU TÉLESCOPE



Poussiéreux, mais complet et en très bon état, le télescope pyréliométrique de Féry a nécessité quelques travaux, financés par l'association ESPCI Alumni. Son miroir, notamment, avait besoin d'une nouvelle surface réfléchissante (en haut). La Société astronomique de France a pris en main cette opération. Après avoir mesuré sa sphéricité, elle a décidé de procéder à l'aluminisation de la surface, l'argenture d'époque n'étant plus pratiquée aujourd'hui (en bas). De son côté, mon atelier-laboratoire a analysé le thermocouple : était-il encore fonctionnel ? Nous avons décidé de rendre interchangeable ce capteur : l'appareil serait présenté avec le capteur d'origine, mais mis en fonctionnement avec un thermocouple reconstruit et invisible. Durant l'été 2017, j'ai donc mis au point et monté un nouveau capteur thermoélectrique qui, associé au miroir restauré, a donné toute satisfaction en observation solaire. Ces travaux nous ont aussi permis de reconstituer le cheminement de Féry et Millochau pour concevoir et réaliser l'instrument avec les savoirs de l'époque. La seule présentation de l'appareil sans remise en fonctionnement n'aurait pu le permettre...

BERNARD PIGELET
restaurateur d'instruments scientifiques

cuiivre et de nickel), constitua la soudure chaude du thermocouple. Le fonctionnement de l'appareil est simple: « Pour se servir de l'actinomètre, on le pointe dans la direction du Soleil, et on le maintient en direction aussi exactement que possible, puis l'observateur lit la déviation marquée [sur le galvanomètre couplé] et note le temps au moment où la lecture est faite. »

Comme pour le pyréliomètre, il suffit de l'étalonner avant ou après la mesure.

Au cours de la mission de l'été 1907, Millochau constata, comme attendu, que l'inertie de l'actinomètre était beaucoup plus grande que celle du pyréliomètre: le petit cylindre atteignait l'équilibre thermique en 23 minutes. L'instrument joua néanmoins son rôle et donna une première valeur de la constante solaire égale à 0,166 watt par centimètre carré, corrigée des 11 % d'absorption de l'atmosphère terrestre. Cela permit de déterminer le coefficient inconnu et ainsi de calibrer le pyréliomètre en mode actinomètre.

Les deux savants s'arrêtèrent à cette preuve de principe et présentèrent leurs nouveaux résultats à l'Académie des sciences début 1908. Ils ne proposèrent pas d'étude de la variation de la constante solaire au cours du temps, malgré une remarque de Millochau: « Il est presque certain que cette constante varie, et c'est même l'étude de cette variation probable qui serait la plus intéressante. » On sait aujourd'hui que cette « constante » est en réalité la moyenne d'une valeur fluctuante, le Soleil présentant une activité cyclique. Dans les années suivantes, Féry poursuivit ses travaux en précisant les conditions d'application de la loi de Stefan-Boltzmann à l'astronomie.

BIBLIOGRAPHIE

D. Beaudouin et al.,
Un instrument retrouvé : le pyréliomètre,
L'Astronomie, mars 2018.

G. Durey et al., **Le télescope pyréliométrique de Charles Féry et la mesure de la température du Soleil,** *Nuncius*, à paraître.

D. Beaudouin,
Charles Beaudouin : une histoire d'instruments scientifiques,
EDP Sciences, 2005.

C. Féry et G. Millochau,
Contribution à l'étude de l'émission calorifique du Soleil, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences*, vol. 143, pp. 505-507, 570-572, 731-734, 1906.

Leur solution consistait à accompagner le pyréliomètre d'un... actinomètre. Les deux instruments sont très différents, comme l'explique Millochau: « Le télescope pyréliométrique donne directement la température apparente d'un élément de surface du radiateur visé, alors que l'actinomètre donne l'effet global du faisceau solaire et mesure directement la constante solaire. »

Ainsi, le rôle de l'actinomètre serait de fournir une première valeur de la constante solaire. Cette valeur permettrait de lever l'indétermination sur l'expression calculée à partir des grandeurs mesurées par le pyréliomètre, et ce dernier fournirait ainsi par la suite, avec plus de rapidité, de nouvelles valeurs de la constante solaire.

Féry conçut donc un actinomètre (aussi conservé à l'ESPCI) qui, contrairement à celui d'Ångström, le plus répandu à l'époque, ne nécessitait pas de courant compensateur. Sur une sphère métallique de 10 centimètres de diamètre, creuse et noircie à l'intérieur, il fixa un petit cylindre métallique qui, relié à deux tiges, l'une en laiton, l'autre en constantan (alliage de

RETOUR A L'ESPCI

En dehors de ces deux expéditions, on ne connaît pas d'autres contributions du télescope pyréliométrique à la recherche. Il fut en revanche très vite utilisé à des fins d'enseignement. Dès novembre 1907, des élèves de la 24^e promotion de l'ESPCI procédaient à l'étalonnage du télescope lors d'une séance de travaux pratiques. Le dernier emploi connu de l'instrument remonte à 1933, date à laquelle il a été exposé à la bibliothèque de l'école à l'occasion des célébrations du 50^e anniversaire de l'institution. S'agissant d'un appareil destiné à un usage très précis en recherche fondamentale, on peut comprendre qu'il n'ait pas été réutilisé par la suite; c'est probablement pourquoi il nous est parvenu en bon état, 111 ans après sa fabrication. Aujourd'hui, l'instrument est entièrement restauré (voir l'encadré ci-dessus). Il est donc à nouveau possible de l'utiliser pour mesurer la température de la surface solaire. Mais il n'est pas envisagé – pour l'instant – de le porter au sommet du mont Blanc! ■

R

ENDEZ-VOUS

P.80 Logique & calcul
P.86 Art & science
P.88 Idées de physique
P.92 Chroniques de l'évolution
P.96 Science & gastronomie
P.98 À picorer

L'ALGORITHME DES COQUILLAGES

Pour les mollusques, s'enrouler en spirale afin de construire un abri permanent se fait de multiples façons. Toutes sont des variantes d'un procédé général qu'on s'efforce de reproduire.

L'AUTEUR



JEAN-PAUL DELAHAYE
professeur émérite
à l'université de Lille
et chercheur au Centre
de recherche en
informatique, signal
et automatique de Lille
(Cristal)

L'intelligence artificielle prétend imiter l'intelligence humaine; elle avance sûrement, mais lentement. En biologie, des projets pour modéliser informatiquement une cellule en respectant toute sa complexité sont en cours, aussi difficiles qu'ils soient. Heureusement les coquillages, du moins leur partie calcaire, se laissent mieux copier.

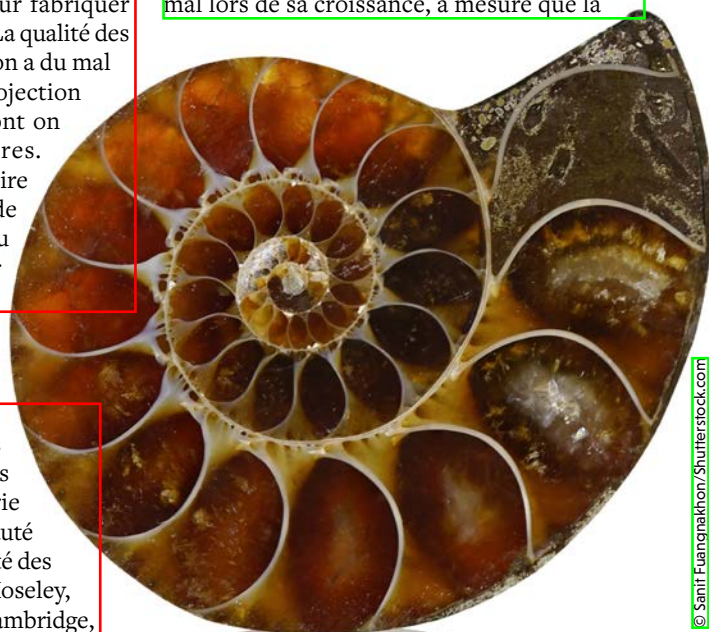
Les recherches sur la forme et les dessins à la surface des coquillages permettent aujourd'hui d'écrire des programmes de quelques dizaines de lignes qui, transmis à des imprimantes 3D, les guident pour fabriquer des modèles nombreux et variés. La qualité des objets ainsi produits est telle qu'on a du mal à croire qu'ils ne sont que la projection d'une formule mathématique dont on fait varier quelques paramètres. Francesco De Comitè, du laboratoire Cristal, à Lille, est un expert de cette informatique imitatrice du vivant et que l'on doit considérer comme un art mathématique.

en Angleterre, expliquait dans un article de 1838 les premiers éléments de cette mathématisation du vivant:

«Il y a une uniformité mécanique observable dans la structure des coquilles d'une même espèce; elle suggère que la figure génératrice des nouvelles couches augmente en taille en même temps que la chambre en forme de spirale se développe selon une simple loi géométrique. En considérant l'opercule de certaines classes de coquilles, la détermination de cette éventuelle loi semble possible. Continuellement agrandi par l'animal lors de sa croissance, à mesure que la

UNE HISTOIRE QUI REMONTE AU XIX^e SIÈCLE

La régularité de la forme des coquillages a depuis longtemps frappé les esprits, et l'idée que des considérations de pure géométrie pouvaient donner la clé de leur beauté a, dès le début du XIX^e siècle, suscité des travaux. C'est ainsi que Henry Moseley, professeur au King's College de Cambridge,



Jean-Paul Delahaye a récemment publié: **Les Mathématiciens se plient au jeu**, une sélection de ses chroniques parues dans *Pour la Science* (Belin, 2017).

LES COQUILLAGES DE FRANCESCO DE COMITÉ, CONSTRUITS AVEC UNE IMPRIMANTE 3D

1



Lyria planicostata

Voluta musica

Cypraea diluculum



Nautilus pompilius

Natica undulata

Amoria macandrewi

Amoria dampiera

construction de sa coquille avance, l'opercule élargit progressivement la chambre spirale.»

Le modèle mathématique qui se déduit de ces remarques ne sera plus ensuite guère modifié. Il est décrit dans l'encadré 2 avec des notations modernes.

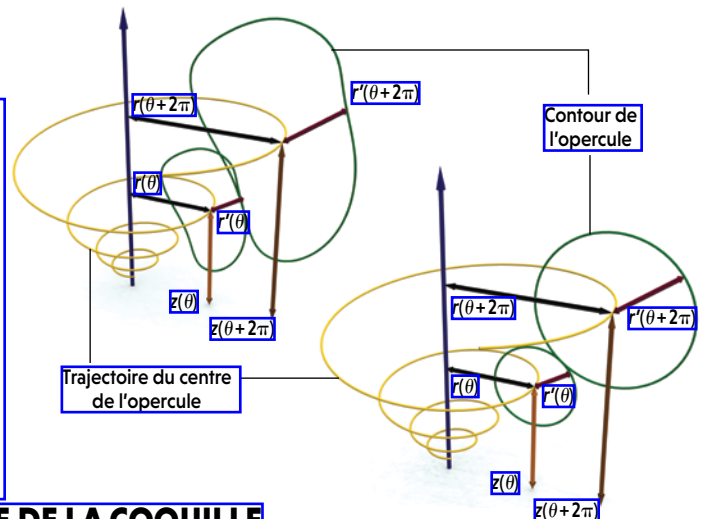
CROISSANCE EN SPIRALE LOGARITHMIQUE

Certains aspects des mécanismes biologiques de croissance, même s'ils sont assez élémentaires, ne sont pas simples à justifier pleinement en pratique. En effet, pourquoi, par exemple, la croissance reste-t-elle proportionnellement constante, et non pas de plus en plus faible ou de plus en plus forte?

La forme résultante est une spirale logarithmique dans l'espace. C'est la seule spirale qui, lorsqu'on lui applique un agrandissement, reste identique à elle-même. Cette propriété géométrique remarquable est peut-être un avantage évolutif, ou au moins une facilitation dans l'adaptation de l'animal à prendre des tailles différentes. Cependant, cette propriété n'est pas facile à justifier, puisqu'elle n'est pas générale dans le monde animal: un adulte n'est pas un enfant deux fois plus grand ou plus; il a proportionnellement une tête plus petite.

Ces questions géométrico-mathématiques font maintenant partie de la biologie, et cela grâce principalement à un célèbre ouvrage dont on vient de fêter le centenaire: *On Growth and Form* (le titre français est *Forme et croissance*), de l'Écossais D'Arcy Thompson, œuvre dont la première édition parut en 1917.

2



GÉOMÉTRIE DE LA COQUILLE

La surface externe

De nombreux coquillages est l'enveloppe de la courbe dessinant l'ouverture (l'opercule). L'opercule se déplace dans l'espace de telle façon que le centre de la courbe-opercule parcourt une hélice de rayon croissant, une spirale, en même temps que sa taille augmente et que le plan de la courbe-opercule tourne en restant perpendiculaire au dessin de l'hélice dans l'espace.

Si r est la distance du centre de l'opercule à l'axe vertical, z la coordonnée selon l'axe vertical de ce centre et θ l'angle de l'opercule le long de la spirale, la position du centre est donnée

par : $r(\theta) = r_0 k_1^{\theta/2\pi}$, $z(\theta) = z_0 k_2^{\theta/2\pi}$. Les paramètres r_0 et z_0 indiquent la position initiale de l'opercule à l'instant où la croissance commence, tandis que k_1 et k_2 sont les facteurs de croissance quand la courbe fait un tour complet. À chaque tour, le rayon est multiplié par k_1 , la hauteur du centre par k_2 . Il faut aussi que le rayon de l'opercule augmente à chaque tour d'un facteur k_3 . Dans les cas les plus simples, l'opercule sera un cercle et $k_1 = k_2 = k_3$, noté k .

Pour que les opercules soient tangents quand le centre a fait un tour complet, il faut que le rayon $r'(\theta)$ de l'opercule vérifie : $r'(\theta) = \sqrt{(r_0^2 + z_0^2)[(k-1)/(k+1)]} k^{\theta/2\pi}$.



▢ L'ouvrage défend l'idée que la biologie surestime le rôle de l'évolution en négligeant les contraintes physiques et mécaniques, qui sont des facteurs déterminants dans l'organisation et les formes des organismes vivants et de leurs composants.

Richement illustré, ce livre s'intéresse aux ailes des insectes, aux plumes des oiseaux, aux cornes plus ou moins enroulées des mammifères, aux méduses, aux graines végétales. Il traite soigneusement de la physique et de la délicate géométrie des contacts cellulaires

et des agrégats cellulaires, de la solidité et de la souplesse des os. Il étudie les structures géométriques de différentes espèces de poissons et établit des liens, introduisant une théorie des transformations aujourd'hui utile aux méthodes informatiques dans le domaine de la reconnaissance des formes. Il considère les alvéoles des ruches d'abeilles et, à cette occasion, le remplissage de l'espace par des polyèdres. Il ne manque pas de s'émerveiller des flocons de neige, des fascinants squelettes des radiolaires (organismes unicellulaires à

3

AUTOMATES CELLULAIRES À UNE DIMENSION

Pour déterminer le motif coloré que présente un coquillage, la méthode la plus simple qui s'appuie sur l'idée de la croissance de la coquille couche par couche est celle des automates cellulaires unidimensionnels. En voici l'idée.

Un dessin quelconque composé de cases blanches et noires alignées (ou disposées en cercle) est donné. Par exemple : ...blanc, blanc, blanc, noir, blanc, blanc, blanc..., que nous noterons ...bbbnbbb... On choisit une règle d'évolution. Par exemple :

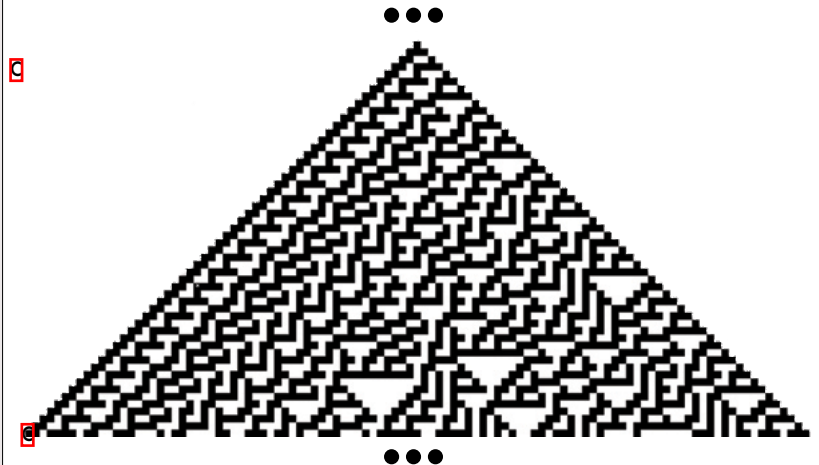
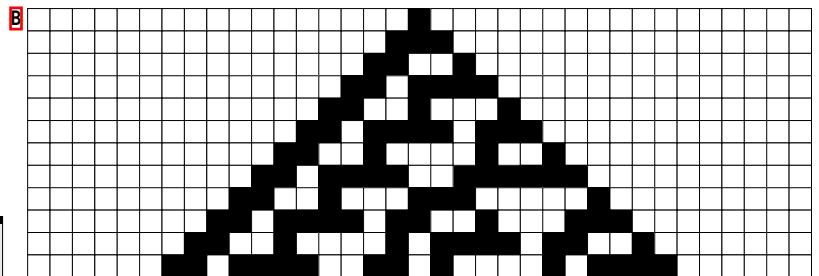
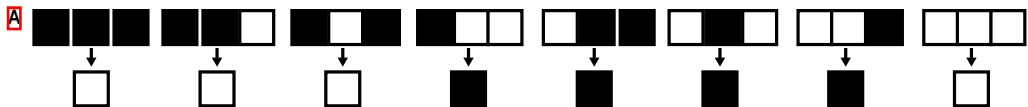
si on a *nnn*, la case centrale devient *b* ;
si on a *nnb*, la case centrale devient *b* ;
si on a *nbnn*, la case centrale devient *b* ;
si on a *nbb*, la case centrale devient *n* ;
si on a *bnn*, la case centrale devient *n* ;
si on a *bnb*, la case centrale devient *n* ;
si on a *bbn*, la case centrale devient *n* ;
si on a *bbb*, la case centrale devient *b*.

Cette règle est schématisée par la figure A.

Partant de la ligne ...bbbnbbb..., en écrivant les lignes qui s'en déduisent successivement, on obtient les figures B et C.

La méthode, appliquée ici à une ligne initialement infinie, s'adapte de façon évidente à une courbe fermée, et donc à la croissance d'un coquillage qui ajoute des couches nouvelles à son opercule, pourvu qu'on accepte l'idée d'une discrétisation des couleurs, ici au nombre de deux (noir et blanc).

Le type de résultats obtenu, après impression 3D, est représenté en D.



squelette siliceux, faisant partie du plancton marin) et, bien sûr, des coquillages.

L'ouvrage de D'Arcy Thompson a eu une grande influence en biologie en remettant à sa juste place la physique; et indirectement les mathématiques: les lois physiques créent des formes qu'on ne comprend qu'en résolvant des systèmes d'équations parfois assez complexes, et donc en mettant en œuvre les outils mathématiques de l'analyse.

DES FORMES CONSTRUITES PAR UNE IMPRIMANTE 3D À PARTIR D'UNE FORMULE UNIQUE

Revenons à nos coquillages et considérons le modèle le plus simple qui les décrit. Conduit-il à reproduire de manière satisfaisante les espèces connues? Jusqu'à récemment, les outils informatiques ne permettaient que d'envisager des modèles de coquillages dans la mémoire de l'ordinateur ou projetés sur un plan, celui-ci étant l'écran d'un terminal ou une feuille de papier. Les imprimantes 3D, dont les développements techniques se sont accélérés, offrent la possibilité d'aller plus loin en transformant les équations, trouvées ou supposées, en objets qu'on prend en main, qu'on soupèse, qu'on examine avec soin... et qu'on met contre son oreille pour «entendre la mer»!

Rappelons que les imprimantes 3D fonctionnent à partir d'une définition mathématique de l'objet que l'on veut obtenir, définition qui s'exprime dans un programme informatique. Ces machines produisent parfois des objets impossibles à obtenir par des techniques de moulage ou par des découpages et usinages classiques (par exemple un cube dont l'intérieur serait creusé pour laisser un espace vide qui aurait la forme de votre tête). Mais tout n'est pas possible.

En effet, les diverses parties de la forme sculptée par l'imprimante ou fabriquée couche par couche doivent être liées dans l'espace si l'on veut un objet qui garde sa rigidité. Surtout, l'objet visé ne doit pas comporter de parties trop fines que l'imprimante serait incapable de créer, ou qui fragiliseraient trop le résultat final.

Les formes réalisées par Francesco de Comitè (voir les encadrés) ont toutes été obtenues à partir d'une unique formule traduite en programme et qui ne comporte que quelques paramètres qu'il a fait varier en exploitant le modèle mathématique présenté dans l'encadré 2. Ces paramètres géométriques sont principalement ceux qui déterminent la spirale tridimensionnelle décrite par le centre de l'opercule lors de la croissance du coquillage, auxquels il faut ajouter les paramètres de la courbe correspondant à la forme de l'opercule ainsi que quelques données pour spécifier les motifs décorant la surface du coquillage.

4

D'ARCY THOMPSON (1860-1948)

Né en 1860 d'un père professeur de grec au Queen's College de Galway, en Irlande, D'Arcy Wentworth Thompson était marin et naturaliste, en même temps qu'un fin helléniste, un bon géomètre et un physicien expert.

Il a occupé durant trente-deux ans le poste de professeur d'histoire naturelle à l'université Saint-Andrews, à Dundee, en Écosse. Il a été élu Fellow de la Royal Society en 1916, puis anobli en 1937 et récompensé de la médaille Darwin en 1946. C'était un remarquable orateur qui avait un don exceptionnel pour les langues.

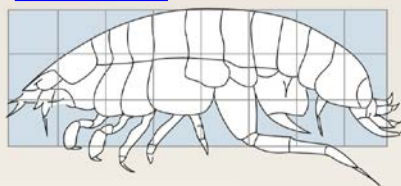
Son livre *On Growth and Form*, paru en 1917, et dont la seconde édition en 1942 était encore plus volumineuse, développait ce qu'on dénomme aujourd'hui les biomathématiques

(voir les sites <https://archive.org/details/ongrowthform00thom> et www.ongrowthandform.org).

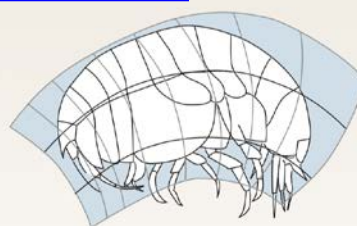
Sa théorie des transformations, dont il donna une version pratique illustrée par des images qui parlent d'elles-mêmes, est un outil maintenant formalisé pour étudier et comprendre les formes et leurs liens (voir l'article d'Yves Bouligand, « D'Arcy Thompson et la logique des formes », *Dossier Pour la Science* n° 44, pp. 4-9, juillet-septembre 2004).

Certains animaux semblent ainsi avoir des formes très différentes. On comprend qu'en réalité, ils sont proches, car une simple transformation géométrique permet de passer de l'un à l'autre. L'analogie est rendue visuellement évidente par la superposition d'un quadrillage sur les figures, comme ci-dessous.

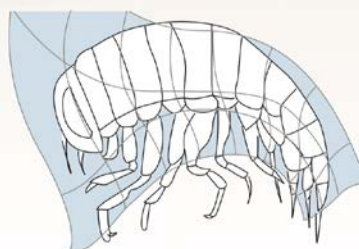
Harpinia plumosa



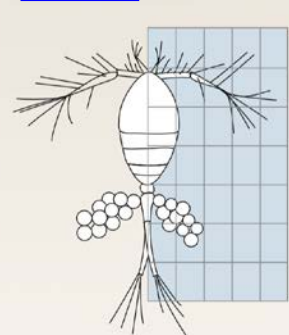
Stegocephalus inflatus



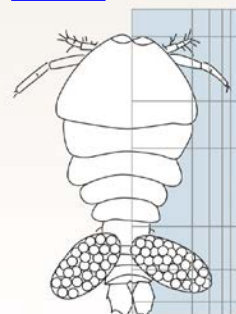
Hyperia galba



Oithona nana



Sapphirina

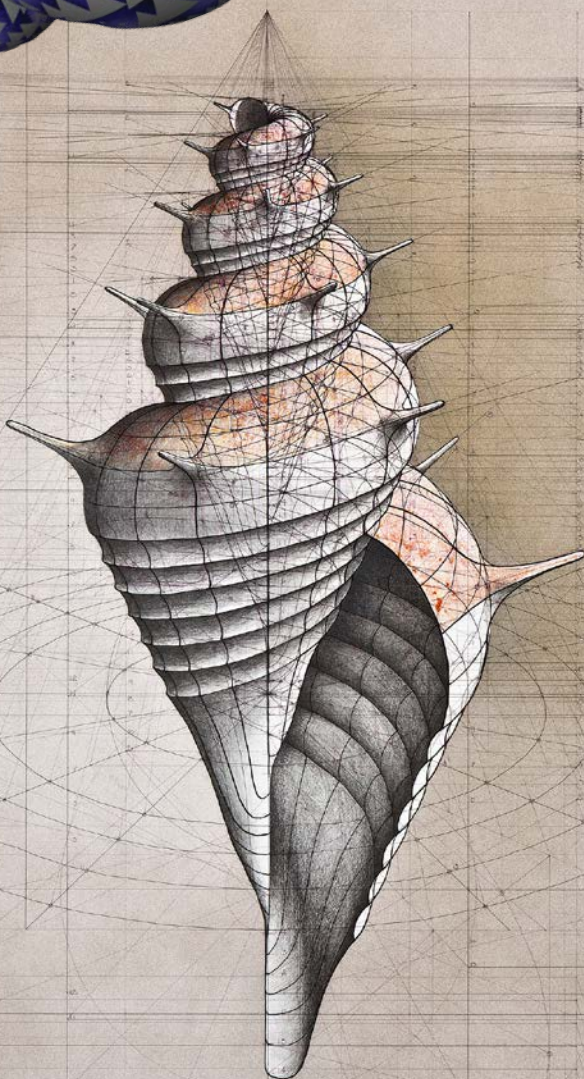
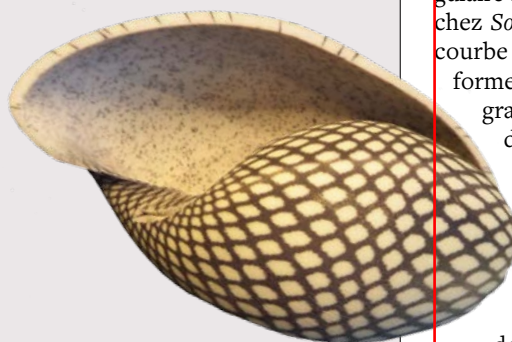


COQUILLAGES IMAGINAIRES
ET MUREX

5

Avec un programme général, Francesco De Comit  a su jouer avec les paramètres pour produire des coquillages imaginaires. Toutefois, rien n'est simple dans le monde vivant et c'est vrai même dans celui, réduit,

des coquillages. Les murex et leur famille, coquillages munis d'élégantes piques, superbement dessinés par l'artiste vénézuélien Rafael Araujo, échappent au modèle élaboré actuellement.



Pour ce qui est de la forme de l'opercule, le passage suivant montre que D'Arcy Thompson avait non seulement compris le principe abstrait de la construction, mais que son œil expert de naturaliste savait identifier les paramètres qui caractérisent une espèce de coquillage:

« La courbe génératrice [de l'opercule] adopte des formes très variées. Elle est circulaire chez *Scalaria*, *Cyclostoma* et *Spirula*; on peut la considérer comme une portion de cercle chez *Natica* ou *Planorbis*. Elle est triangulaire chez *Conus* ou *Thatcheria*, et rhomboïde chez *Solarium* ou *Potamides*. Très souvent, la courbe génératrice adopte plus ou moins la forme d'une ellipse: chez *Oliva* et *Cypraea*, le grand axe de l'ellipse est parallèle à celui de la coquille; [...] et dans de nombreux cas bien document s, tels que *Stomatella*, *Lamellaria*, *Sigaretus haliotides* et *Haliotis*, le grand axe de l'ellipse est oblique par rapport à celui de la coquille. Cette courbe génératrice devient presque une demi-ellipse chez *Nautilus pompilius* et un peu plus qu'une demi-ellipse chez *Nautilus umbilicatus*, le grand axe étant dans les deux cas perpendiculaire à l'axe de la coquille. La forme de la courbe ne se prête que rarement à une expression mathématique simple. [...] Chez certaines ammonites, celles du groupe '*Cordati*', [...] la courbe génératrice correspond presque exactement à une cardioïde d'équation $r = a(1 + \cos \theta)$. »

DIFFICULTÉS INFORMATIQUES
ET DESSINS DE SURFACE

Pour disposer d'une définition mathématique que l'imprimante 3D comprenne, il faut non seulement s'occuper de définir la surface externe du coquillage, mais aussi sa surface interne, qui est du même type. Il faut lier les deux surfaces en opérant de telle manière que le volume délimité soit sans trou, jamais trop fin et n'exigeant pas une précision dans les détails supérieure à celle fournie par l'imprimante.

Cette construction du volume demande donc un travail qui ne se réduit pas à écrire les formules proposées par l'analyse géométrique décrite dans l'encadré 2. En utilisant une méthode classique, Francesco De Comit  obtient la solution en transformant les surfaces en un très grand nombre de triangles attachés, triangles qui lui sont aussi utiles pour colorier la surface. La taille du programme, une fois débarrassé des commentaires et réduit à l'essentiel, est de 4000 caractères (ou octets), soit une grande page environ.

Au-delà de la forme des coquillages, qui est assez bien maîtrisée, un second défi se présente au modélisateur, celui des motifs colorés à la surface des coquillages.

BIBLIOGRAPHIE

F. De Comité, **Modelling seashells shapes and pigmentation patterns : Experiments with 3D printing**, *Proceedings of Bridges 2017 : Mathematics, Art, Music, Architecture, Education, Culture*, Tessellations Publishing, 2017.

P. Chossat, **Des équations pour de bons motifs**, *Dossier Pour la Science* n° 91, avril-juin 2016.

Y. Bouligand, **D'Arcy Thompson et la logique des formes**, *Dossier Pour la Science* n° 44, juil.-sept. 2004.

H. Meinhardt, **The Algorithmic Beauty of Sea Shells**, Springer (4^e éd.), 2009.

D. W. Thompson, **Forme et croissance**, Seuil/Éditions du CNRS, 1994.

S. Wolfram, **Cellular automata as models of complexity**, *Nature*, vol. 311, pp. 419-424, 1985.

A. Turing, **The chemical basis of morphogenesis**, *Phil. Trans. B.*, vol. 237, pp. 37-72, 1952.

H. Moseley, **On the geometrical forms of turbinated and discoid shells**, *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, vol. 128, pp. 351-370, 1838.

Une première méthode pour les reproduire consiste à les capter par un procédé photographique et à les plaquer à la surface des coquilles artificielles que l'on programme. Cela donnera bien sûr d'assez bons résultats, mais il s'agit d'une forme de tricherie qui ne permettra pas d'obtenir un court modèle mathématique, puisqu'il faut beaucoup d'informations pour mémoriser l'image, copiée pixel par pixel, de la surface d'un vrai coquillage.

Heureusement, des procédés plus satisfaisants semblent possibles. Ils se fondent sur l'idée que la coquille provient des tranches d'opercule qui se construisent successivement. Le rayon s'accroît et ces tranches sont colorées selon des règles simples, qui déterminent la coloration de chaque nouvelle tranche en fonction des précédentes. Le plus souvent, la couleur d'un point de la tranche $n+1$ se déduit de celle du point de la tranche n situé au même endroit et de ses voisins. Parfois, pour déterminer le motif de la tranche $n+1$, il sera utile d'utiliser les motifs de plusieurs tranches antérieures à la tranche n .

Les Britanniques Conrad Waddington et Russell Cowe ont adopté cette hypothèse dès 1969, suivis en 1984 par leur compatriote Stephen Wolfram, le célèbre créateur du logiciel de calcul formel Mathematica. Ils ont supposé que les points étaient colorés en respectant les règles d'un automate cellulaire unidimensionnel. Ce type de mécanismes, imaginé par le mathématicien d'origine hongroise John von Neumann dans les années 1940, est le plus simple qu'on puisse concevoir pour définir des interactions déterministes entre objets discrets (voir l'encadré 3).

L'hypothèse des automates cellulaires, qui, pour un informaticien, est la plus facile à programmer, ne semble cependant pas s'appuyer sur des considérations biologiques précises. Au moins à titre d'essai, elle méritait d'être explorée et ce qu'elle donne ressemble vaguement à ce que l'on observe dans la nature. L'une des raisons de ce succès limité est que l'on utilise souvent les automates cellulaires avec deux couleurs, ce qui est insuffisant pour reproduire avec précision la complexité des pigmentations des coquillages.

Une hypothèse plus proche de la biologie s'inspire de la vision que le mathématicien britannique Alan Turing a développée dans les dernières années de sa vie pour décrire des modèles mathématiques de la morphogenèse. Adoptée par les biologistes allemands Hans Meinhardt et Martin Klingler, elle a été reprise par Francesco de Comité.

L'idée est celle d'une activation à courte distance combinée à une inhibition plus prolongée déterminées par deux substances, un activateur et un inhibiteur. La concentration de chacune d'elles dépend de leurs concentrations

en chaque point dans les étapes précédentes de la construction. Le modèle est continu et s'exprime par des équations aux dérivées partielles (équations différentielles où les fonctions dépendent de plusieurs variables).

Voici un exemple de ces équations.

$$\frac{\partial a}{\partial t} = s \left(\frac{a^2}{b} + b_a \right) - r_a a + D_a \frac{\partial^2 a}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial b}{\partial t} = s a^2 - r_b b + D_b \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} + b_b$$

Sans entrer dans les détails, indiquons que $a(x, t)$ et $b(x, t)$ sont les concentrations de l'activateur a et de l'inhibiteur b . Elles dépendent du temps t et de la position x de la zone colorée sur le contour de l'opercule, assimilé à une courbe. Les coefficients D_a et D_b sont les paramètres de diffusion; plus leur valeur est élevée, plus la diffusion des substances est rapide. Les coefficients r_a et r_b caractérisent les vitesses de décroissance des concentrations a et b (pour d'autres précisions, voir le magnifique livre de Hans Meinhardt, *The Algorithmic Beauty of Sea Shells*, Springer, 2009, page 23).

JEUX ESTHÉTIQUES ET NOUVEAUX DÉFIS

Après avoir cherché à imiter au mieux la réalité du monde biologique et en avoir découvert et exploité certains des secrets pour fabriquer des formes qui en imitent les créatures, il est amusant de jouer avec le modèle obtenu. On produit alors des formes aussi belles que les vraies, mais qui n'existent pas dans la nature (voir l'encadré 5).

Cependant, la nature, qui n'a pas joué à fabriquer tous ces pseudo-coquillages que la maîtrise acquise permet de créer, a exploré d'autres voies plus complexes... qui échappent aujourd'hui aux modélisateurs. En particulier, les coquillages de la famille des *Muricidae* (dont fait partie le genre *Murex*), utilisés depuis l'Antiquité pour extraire la pourpre, présentent des piques régulières.

Ces structures qui échappent au modèle mathématique général utilisé pour les autres coquillages exigent des compléments et provoqueront sans doute une complication des programmes actuels. Francesco de Comité réfléchit à la façon dont on pourrait franchir l'obstacle créé par ces exceptionnels et récalcitrants coquillages. S'il réussit, ne croyons pas que le travail de modélisation du réel touchera alors à sa fin: le monde du vivant ne se limite pas aux coquillages et son inventivité ne se laissera pas réduire facilement à quelques formules mathématiques, quels que soient le soin et l'intelligence que nous y consacrerons. ■

L'AUTEUR



LOÏC MANGIN
rédacteur en chef adjoint
à *Pour la Science*

LE MONDE DANS UN SAVON

Parmi les nombreuses propositions à la croisée de l'art et de la science présentées lors de l'événement *Nous ne sommes pas le nombre que nous croyons être*, il était un savon qui avait beaucoup à raconter...

D

u 2 au 3 février, la Cité internationale des arts, à Paris, a résonné des pas d'un public nombreux venu arpenter les multiples espaces de l'institution. À quoi ont-ils assisté? À *Nous ne sommes pas le nombre que nous croyons être*, un foisonnement d'expériences inédites où se sont côtoyés artistes, scientifiques et penseurs pendant... 36 heures d'affilée! À l'initiative de l'événement, on trouve la fondation Daniel et Nina Carasso, en partenariat avec la chaire Arts & science portée par l'École polytechnique et l'École nationale

supérieure des arts décoratifs. Selon Jean-Marc Chomaz et Samuel Bianchini, professeurs respectivement dans ces deux établissements, il s'agissait de «voir la science comme un espace de création et l'art comme un espace de recherche scientifique».

Le fil conducteur du programme était *Les Quatre Vents du désir*, un recueil de nouvelles de science-fiction publié en 1982 par l'Américaine Ursula K. Le Guin, décédée en janvier 2018. Pourquoi de la science-fiction en guise de source d'inspiration? Pour imaginer des mondes de demain vraisemblables à travers ateliers, conférences, expositions... Mélanie Bouteloup, commissaire de l'événement, précise que le parti pris était, «plutôt que de proposer des projets finis, de les exposer au milieu de leur processus de création».

Attardons-nous sur l'une des propositions, le projet *Carved to flow*, que l'on doit à Otobong Nkanga, une artiste et

performeuse nigériane. Il s'inscrit dans la continuité du même projet montré lors de la documenta 14, organisée en 2017 à Kassel, en Allemagne, comme tous les cinq ans, mais aussi cette fois à Athènes, en Grèce. À Paris, était présentée *Germination*, la troisième étape du projet, après *Le Laboratoire* et *L'Entrepôt et la distribution*, nous verrons pourquoi.

Le point de départ est un savon noir nommé *o8 Black Stone*, élaboré à Athènes avec la maîtresse savonnière Evi Lachana. Il est composé de charbon de bois, qui lui donne sa couleur, et de sept corps gras (huile d'olive, de laurier, de sauge, de cacao, de karité...) provenant de diverses régions du Moyen-Orient, d'Afrique du Nord et de l'Ouest, nécessaires à sa fabrication (voir la photo de la recette page ci-contre). L'ambition de l'artiste est de révéler le tissu de relations et les liens économiques qui unissent les matières premières et les objets manufacturés.

L'ensemble de ces manifestations ont concouru à donner corps à un leitmotiv de Otobong Nkanga: prendre un élément de notre quotidien pour remonter jusqu'aux conditions environnementales dans lesquelles nous vivons. En d'autres termes, même un savon n'est pas innocent! ■

Pour la Science était partenaire média de l'événement.



A circular collage of various objects arranged in a circular pattern. The objects include a molecular model at the top, a fossilized skull in the upper right, a bar of soap in the center, a coconut and a palm tree on the left, a bar of soap at the bottom, and a circular arrow graphic on the right. The objects are connected by a dark, winding line that forms a circle. The background is a light gray gradient.

LES AUTEURS



JEAN-MICHEL COURTY et ÉDOUARD KIERLIK
professeurs de physique à Sorbonne Université, à Paris

COURONS SOUS LA PLUIE !

Pour éviter d'être trempé par la pluie, mieux vaut courir que marcher. Mais la perméabilité des vêtements peut nuancer cette prescription...

Soudain, alors que vous ne portez qu'un modeste blouson, une averse s'abat sur le chemin de la boulangerie. Que faire? Marcher normalement vers l'abri le plus proche? Ou plutôt courir? À quelle vitesse? Le choix de la meilleure stratégie pour être le moins mouillé possible a suscité de longues discussions chez les physiciens et les mathématiciens. L'affinement progressif de la modélisation, de la prise en compte du vent à celle de la morphologie humaine, a cependant permis de dégager un consensus: mieux vaut courir vite... à moins que les conditions d'imperméabilité des vêtements ne remettent tout en cause!

Lorsqu'il pleut, nous hâtons le pas, et cela d'autant plus que l'averse est intense. L'intuition suggère que moins nous passons de temps à recevoir de l'eau sur la tête, moins nous serons mouillés. C'est toutefois oublier qu'en nous déplaçant

nous modifions la façon dont nous recevons les gouttes.

Si la pluie tombe verticalement, les gouttes arriveront obliquement par rapport à nous. Plus nous avançons rapidement, plus les gouttes frapperont non seulement la tête mais aussi le torse et les jambes, en plus grand nombre et avec une vitesse de plus en plus horizontale. Ainsi, courir réduit la durée d'exposition à la pluie, mais augmente aussi le débit de l'eau reçue. Alors, que faire?

COURIR, MAIS À QUELLE VITESSE?

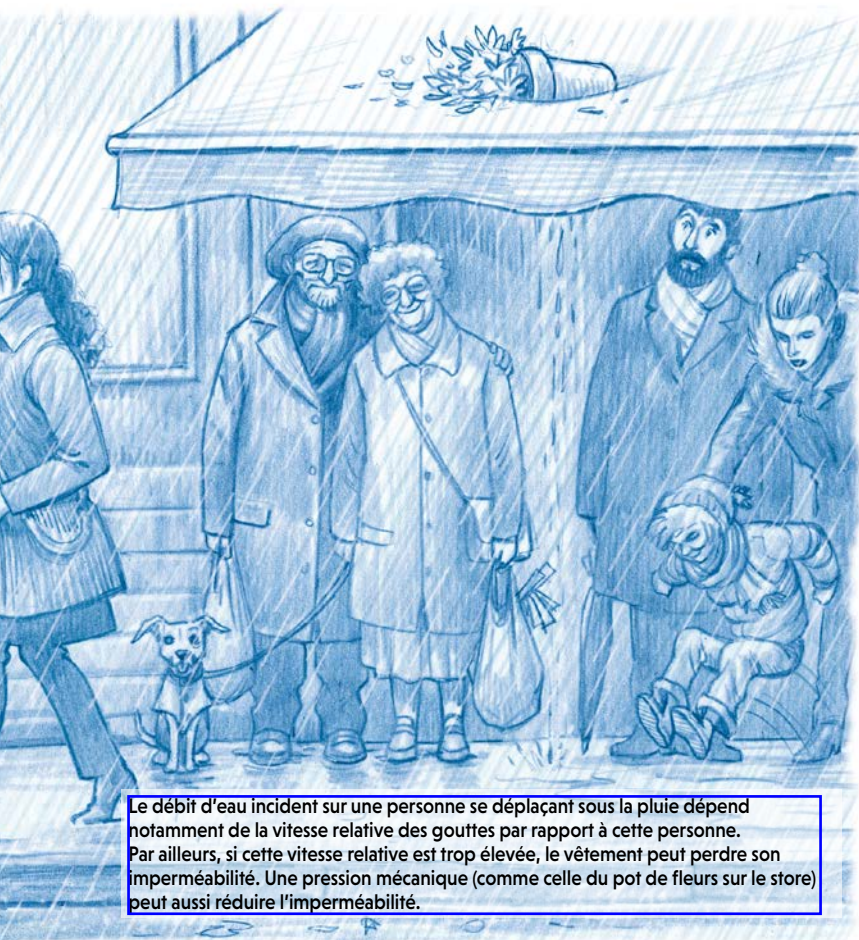
Pour le savoir, Franco Bocci, de l'université de Brescia, en Italie, a évalué en 2012 la quantité d'eau reçue dans une situation simplifiée: une personne se déplaçant en ligne droite vers un abri, à vitesse constante et sous une pluie uniforme. Ses conclusions dépendent peu de la morphologie du corps.



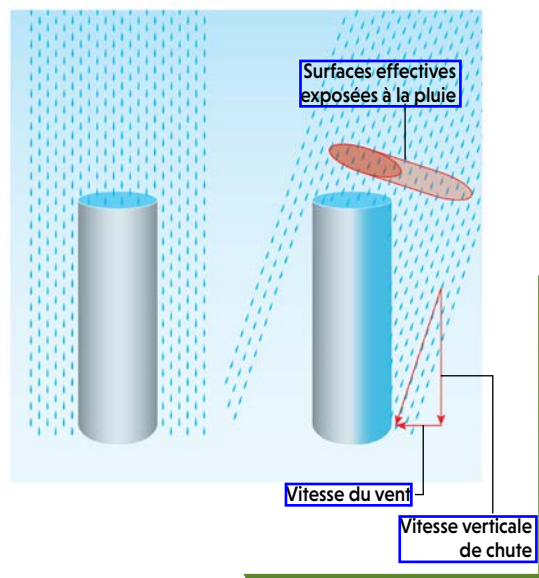
Si la pluie tombe verticalement ou avec un vent de face qui l'entraîne dans son mouvement, il faut courir le plus vite possible. Avec un vent arrière, l'optimum consiste à se déplacer à la même vitesse que le vent; dans cette situation, les gouttes d'eau tombent verticalement par rapport au coureur, donc sur une surface minimale (la tête et les épaules surtout). Cette stratégie n'est toutefois optimale que si la vitesse du vent, donc celle du coureur, est assez élevée pour que le temps passé sous la pluie ne soit pas excessif.

PIÉTON CYLINDRIQUE SOUS LA PLUIE

Pour simplifier les raisonnements et les calculs, on peut assimiler un piéton à un cylindre vertical. Sous une pluie verticale dans le repère du piéton (par exemple piéton immobile en l'absence de vent, ou se déplaçant à la même vitesse que le vent), seule la partie supérieure du cylindre reçoit les gouttes de pluie. Sous une pluie oblique dans le repère du piéton (par exemple piéton immobile en présence de vent, ou se déplaçant en l'absence de vent), le côté du cylindre orienté vers la pluie est également mouillé. Le débit d'eau reçue est proportionnel aux surfaces effectives exposées de front à la pluie, représentées ici en rose.



Le débit d'eau incident sur une personne se déplaçant sous la pluie dépend notamment de la vitesse relative des gouttes par rapport à cette personne. Par ailleurs, si cette vitesse relative est trop élevée, le vêtement peut perdre son imperméabilité. Une pression mécanique (comme celle du pot de fleurs sur le store) peut aussi réduire l'imperméabilité.



En effet, lors d'un déplacement rapide, la pluie traverse les vêtements, même imperméabilisés (on ne parle pas ici des cirés et autres tenues plastifiées), au lieu de s'écouler à leur surface.

DES IMPERMÉABLES PAS SI IMPERMÉABLES...

La plupart des tissus ne sont pas parfaitement imperméables, car l'eau peut s'infiltrer entre les fibres qui les composent. La lecture de notices techniques nous fait découvrir une unité de mesure de l'imperméabilité, le schmerber (Sch). On y apprend que les parapluies de qualité sont confectionnés avec des tissus de

On peut obtenir une estimation quantitative de cette condition en assimilant le coureur à un cylindre vertical (voir l'encadré en haut à droite). On trouve alors que courir à la vitesse du vent n'est optimal que si le rapport entre la vitesse (horizontale) du vent et la vitesse (verticale) de chute des gouttes de pluie dépasse à peu près 0,75 fois le rapport entre notre largeur et notre hauteur. Une condition plus facilement réalisée si l'on est grand et mince que petit et dodu!

En pratique, ce rapport entre largeur et hauteur vaut au minimum de l'ordre

de 0,2-0,25. Sachant que la vitesse de chute des gouttes ne dépasse que très rarement 10 mètres par seconde, on voit qu'un léger vent arrière, supérieur à 2 mètres par seconde, rend possible l'optimum. Encore faut-il courir à la même vitesse que le vent: ce n'est pas vraiment possible en présence de vents plus forts et de bourrasques.

La discussion précédente fait fi de la tenue vestimentaire et des conséquences d'une vitesse de déplacement accrue. Or nous sommes bien plus rapidement trempés à vélo ou en scooter qu'à pied.

Les auteurs ont récemment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



350 Sch, que les vestes en Gore-Tex sont déclarées à 28000 Sch et qu'une norme DIN considère comme imperméable un vêtement qui affiche 1300 Sch. Que signifient ces chiffres en pratique?

Explicitons tout d'abord l'unité de mesure. Les valeurs données précédemment sont les valeurs de la surpression (par rapport à la pression atmosphérique) à partir de laquelle l'eau commence à traverser le tissu (voir l'encadré ci-contre). Cette surpression peut s'exprimer en millimètres de hauteur d'eau, ce qui représente autant de schmerbers. La surpression sous 10 mètres d'eau étant de 1 atmosphère, soit 100000 pascals (Pa), 1 schmerber équivaut à un seuil de pression en eau de 10 Pa.

L'imperméabilité des tissus dépend des fibres et de leur tissage. Ces fibres sont nécessairement hydrophobes: sinon, après avoir imprégné le tissu, l'eau mouillerait l'autre face, puis gouterait. Quelles valeurs d'imperméabilité doit-on atteindre? Étant donné la définition du schmerber, comme une goutte d'eau ne dépasse pas quelques millimètres de diamètre, quelques schmerbers pourraient sembler suffisants pour se protéger de la pluie. Ce n'est pas le cas.

LA PRESSION DES GOUTTES

En effet, si la pression exercée par une goutte posée sur un parapluie est à peine de quelques dizaines de pascals, celle exercée lors de l'impact de la goutte sur le tissu est bien plus élevée. À un coefficient numérique près, cette pression dynamique est égale au produit de la masse volumique de l'eau par le carré de la vitesse de la goutte. Ainsi, l'impact d'une goutte arrivant à 1 mètre par seconde (petite pluie fine) exerce l'équivalent d'une pression de 1000 Pa et cette eau ne traversera donc pas un tissu dont l'imperméabilité dépasse 100 Sch.

Mais dès que la pluie est modérée (gouttes chutant à 4 mètres par seconde), l'eau peut en partie traverser un tissu d'imperméabilité inférieure à 1600 Sch, ce qui est pourtant au-dessus de la norme DIN. Sous un parapluie, nous ressentons alors sur notre visage les goutelettes microscopiques qui traversent le tissu à chaque impact. À 10 mètres par seconde (grosses gouttes d'une forte pluie), mieux vaut porter une veste conçue pour le trekking. Et à moto sous la pluie, seule une combinaison étanche à coutures soudées vous évitera d'être mouillé.

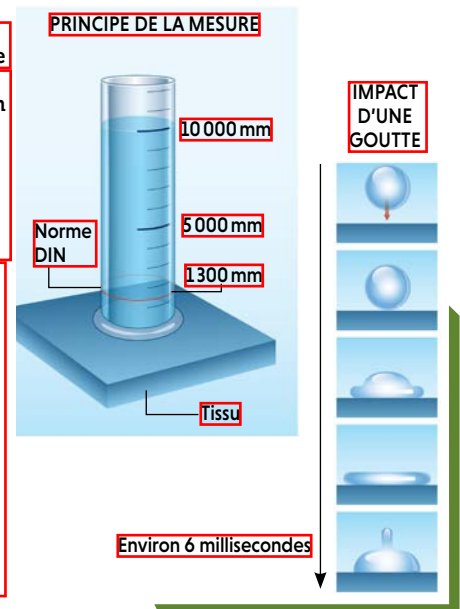
À cela s'ajoute le fait que la zone d'appui des bretelles de votre sac à dos ou les plis dans le vêtement, à proximité de vos

MESURER L'IMPERMÉABILITÉ D'UN TISSU

Le principe est d'appliquer au tissu une pression d'eau et de mesurer le seuil à partir duquel l'eau traverse le textile. Si ce seuil correspond

à la surpression (par rapport à la pression atmosphérique) due à une hauteur d'eau de 1 mm, l'imperméabilité est, par définition, de 1 schmerber (1 Sch). La norme DIN de 1300 Sch correspond ainsi à un seuil de 1300 mm de hauteur d'eau.

L'imperméabilité à la pluie dépend de la vitesse relative des gouttes d'eau par rapport au tissu, car l'impact d'une goutte exerce une pression d'autant plus forte que sa vitesse est élevée. L'impact d'une goutte de quelques millimètres tombant à 1 mètre par seconde (pluie fine) se déroule sur quelques millisecondes. Un tel impact exerce une pression d'environ 1000 Pa, l'équivalent de 100 mm de hauteur d'eau. Pour que le tissu ne soit pas traversé par l'eau, son imperméabilité doit donc dépasser 100 Sch.



articulations, sont autant d'endroits où le tissu peut perdre son imperméabilité, l'eau y étant comprimée comme dans un étai. C'est pourquoi on recommande aux randonneurs le port de vêtements imperméabilisés à 10000 Sch au moins.

Quelles conséquences ont ces chiffres pour notre stratégie? Sous une pluie modérée ou forte sans vent (disons avec des gouttes chutant à plus de 6 mètres par seconde), à moins d'être un athlète, l'allure choisie modifie peu la vitesse relative de la pluie: celle-ci augmente de 10% seulement quand on passe d'une marche normale, à 1 mètre par seconde, à une course à 3 mètres par seconde. Le mouillage des vêtements n'en sera pas beaucoup modifié et on peut donc conserver la stratégie optimale, c'est-à-dire courir vite. L'idée que, avec un vent arrière, on a intérêt à courir à la vitesse du vent s'en trouve aussi renforcée: on diminue la vitesse relative de la pluie, donc la pression qu'elle exerce sur le tissu et, partant, sa pénétration.

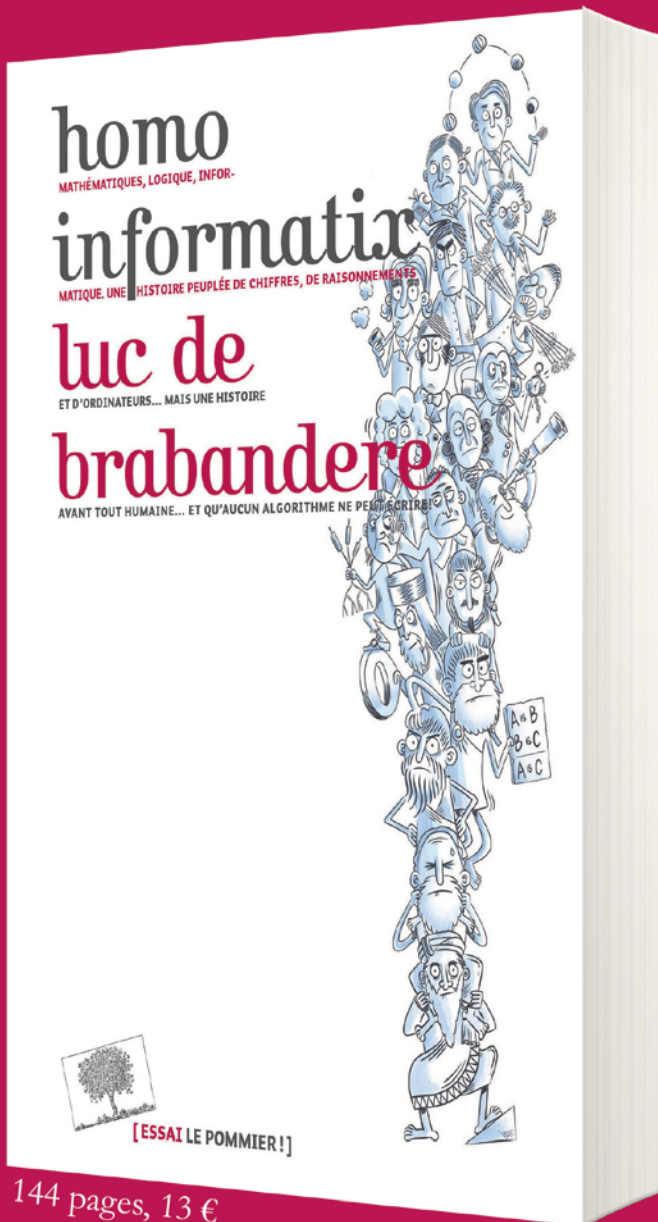
En revanche, sous une petite pluie sans vent et avec un vêtement tout juste imperméable, il faut éviter de courir, car la vitesse relative de la pluie serait alors suffisante pour tremper le vêtement. Ces cas illustrent qu'il devient difficile de conclure sans connaître de nombreux paramètres: vent, force de la pluie, imperméabilités des tissus... En attendant une application dédiée, le physicien ne peut que vous inciter à rester au sec pour éviter de trop y penser! ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Ryu et al., **Water penetration through a superhydrophobic mesh during a drop impact**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 118, article 014501, 2017.

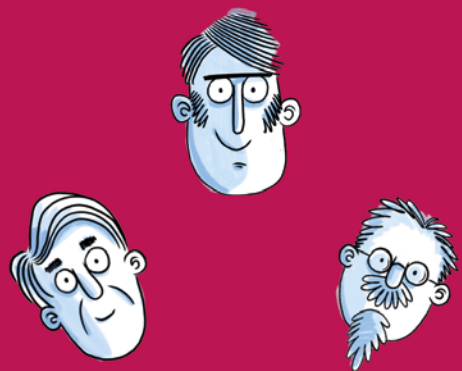
F. Bocci, **Whether or not to run in the rain**, *European Journal of Physics*, vol. 33, pp. 1321-1332, 2012.

Il n'existe pas
d'algorithme
pour écrire le futur.



144 pages, 13 €

Un rêve millénaire.
Des intelligences tout
sauf artificielles.
Un avenir à écrire
nous-mêmes :
l'histoire d'*Homo informatix*
est loin d'être terminée...



Retrouvez toutes nos nouveautés sur notre site
www.editions-lepommier.fr



L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite de biologie
évolutive à Sorbonne
Université, à Paris

LE BIZARRE SONAR DU CACHALOT

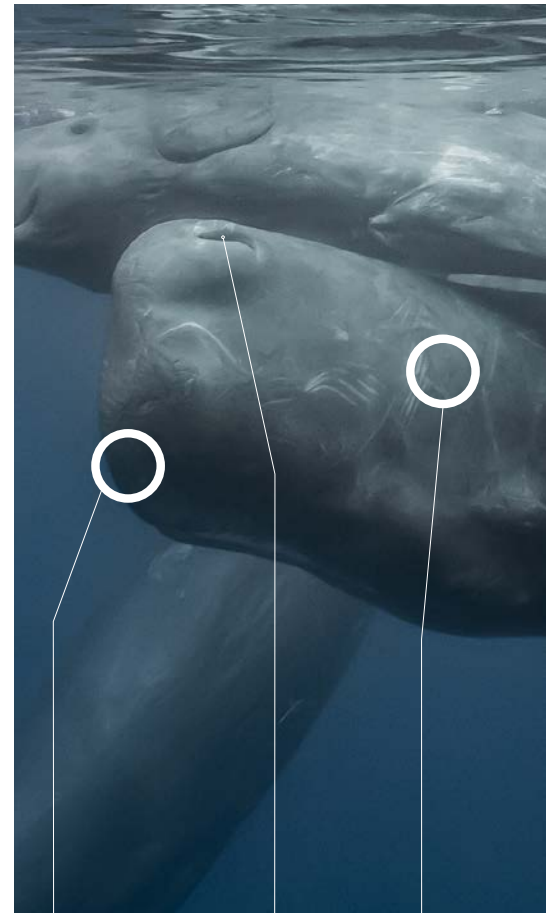
Si tous les dauphins et autres cétacés à dents ont une tête asymétrique, celle du grand cachalot est particulièrement originale. Son asymétrie le dote d'un sonar ultraperformant, même à grande profondeur.

Mis à part quelques groupes comme les éponges et les cnidaires (méduses, coraux...), tous les animaux sont des bilatériens, c'est-à-dire des organismes à symétrie bilatérale. Les zoologistes ont toutefois répertorié de nombreux cas où cette symétrie fondamentale est brisée. Citons les pinces – l'une broyeuse, l'autre coupante – de nombreux crustacés (crabes, homards...), la torsion de la masse viscérale des gastéropodes (bigorneaux, escargots...) ou, en anatomie interne, la place du cœur chez les mammifères.

L'asymétrie des cétacés est de cet ordre. Tous les cétacés à dents, ou odontocètes, ont une asymétrie anatomique du crâne: leurs narines internes sont plus ou moins décalées vers la gauche. Toutefois, si, chez les crustacés, l'avantage est évident et si, chez les gastéropodes et les

mammifères, l'explication évolutive est connue, il n'en est rien chez les odontocètes. Comme ces derniers sont dotés d'un sonar qui leur permet une écholocalisation – se situer par des ondes dans son environnement –, la facilité a longtemps été d'admettre que l'asymétrie était liée à cette fonction. Pourtant, les chauves-souris microchiroptères, qui pratiquent elles aussi l'écholocalisation, ont un crâne parfaitement symétrique! Et chez le dauphin, l'asymétrie de la tête n'intervient pas dans cette fonction (voir l'encadré page 94).

Il y a une dizaine d'années, cherchant une explication différente à l'asymétrie des odontocètes, l'équipe de Graham Pierce, à Aberdeen, en Grande-Bretagne, proposa un lien avec la nutrition. Le système pharyngien des odontocètes est particulier, avec une séparation complète des voies respiratoires et digestives: le larynx, organe respiratoire, traverse le pharynx, qui n'est plus qu'un organe digestif. De fait, ces



Émet des sons allant jusqu'à 230 décibels (le seuil douloureux pour l'homme est à 120 décibels).

Le souffle qu'il projette par son évent, incliné de 45° à gauche, atteint 15 mètres de hauteur.

Grâce à l'écholocalisation, il repère une proie à une distance de 500 mètres.

EN CHIFFRES

33

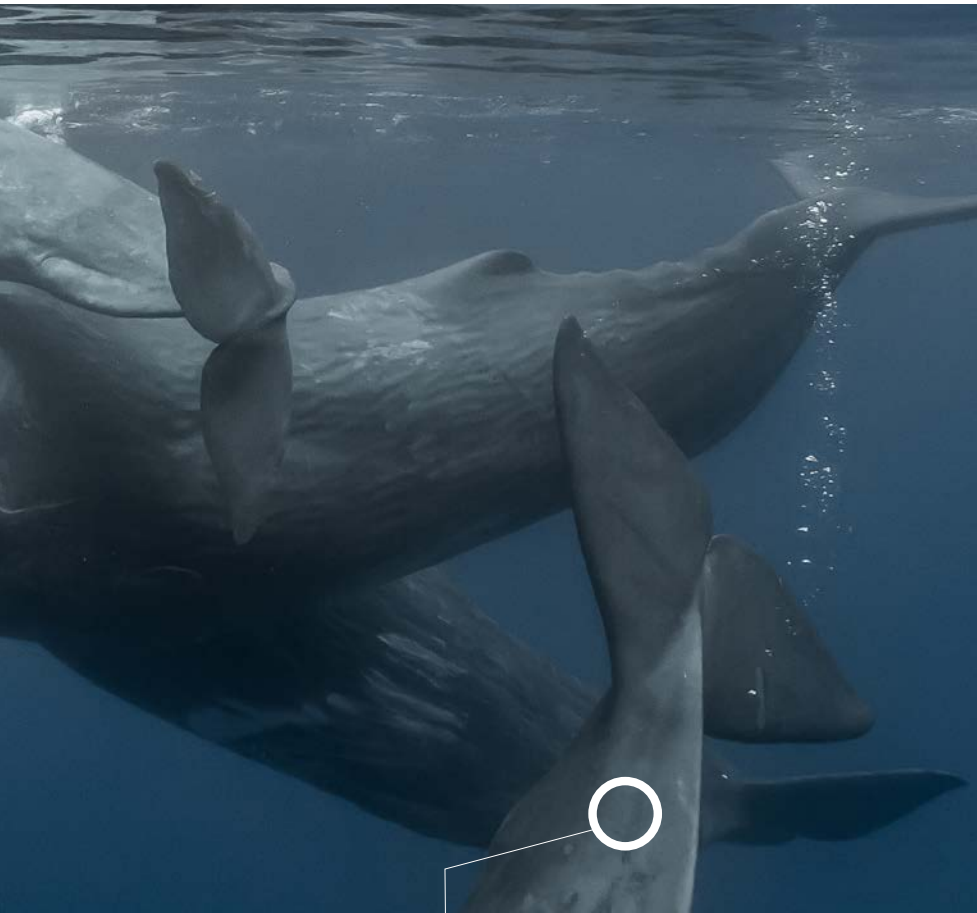
mètres et 100 tonnes : le plus grand des grands cachalots connus, Mocha Dick, avait la taille d'un demi-Boeing et le poids d'une quinzaine d'éléphants d'Afrique. Albinos, tué en août 1959 avec 19 harpons, après 100 combats et 30 marins tués, il inspira à Hermann Melville son *Moby Dick*.

360 000

C'est le nombre estimé de grands cachalots dans le monde, soit une réduction de 67% par rapport à leur population avant l'essor de la chasse commerciale, au XIX^e siècle. L'espèce est protégée depuis 1985.

3

espèces vivantes composent la famille des cachalots : le grand cachalot (*Physeter macrocephalus*), seul représentant vivant du genre *Physeter*, et les cachalots nain (*Kogia sima*) et pygmée (*Kogia breviceps*). Ces derniers ne mesurent que 3 mètres pour 400 kilogrammes.



De fait, l'asymétrie du grand cachalot (*Physeter macrocephalus*) est très marquée : son évent – sa narine externe, à l'extrémité du museau – est nettement décalé vers la gauche. Néanmoins, l'étude précise de l'anatomie de sa tête suggère que les choses sont plus compliquées dans son cas. En 2016, à l'aide d'un modèle informatique tridimensionnel de la tête du grand cachalot construit à partir de l'examen détaillé de deux jeunes spécimens, Stefan Huggenberger, de l'université de Cologne, en Allemagne, et ses collègues ont révélé que l'asymétrie de la tête le dote d'un sonar ultraperformant, même en grande profondeur. Il y aurait donc bien, chez lui, un lien entre asymétrie de la tête et écholocalisation...

UN NEZ À MOTEUR

« Un nez muni d'un moteur hors-bord », surnomme-t-on ce cétacé hors norme que sa queue propulse à plus de 3000 mètres de profondeur au cours de plongées atteignant parfois 90 minutes. Le sang et les muscles stockent l'oxygène nécessaire pour chasser le calmar géant ou le calmar colossal. L'énorme melon, sans commune mesure avec celui du dauphin, repose sur un maxillaire supérieur très allongé qui, comme un berceau, reçoit deux structures adipeuses étagées : en bas, le matelas – *junk* (« camelote ») en anglais, à cause de la mauvaise qualité de l'huile que les baleiniers en tiraient ; au-dessus, le spermaceti qui fournissait une huile très prisée, car ne fumant pas en brûlant.

Il est capable de plonger pendant 90 minutes à 3500 mètres de profondeur.

animaux marins avalent en même temps qu'une proie une grande quantité d'eau, ensuite rejetée, qui ne doit en aucun cas envahir les poumons. Mais cette anatomie complexe crée un danger : une proie volumineuse peut se coincer dans le pharynx. Or le larynx se trouve rejeté vers la gauche, ménageant un conduit digestif de grande taille vers la droite. Anatomiquement, cette rupture de symétrie se répercute sur la structure du crâne, facilement mesurable par la position de l'ouverture dorsale des narines internes. En comparant treize espèces d'odontocètes, Graham Pierce est arrivé à un résultat remarquable : plus les proies ingérées sont grandes, plus l'asymétrie de la tête est importante !



Grand cachalot
(*Physeter macrocephalus*)
Taille : 18 m (mâle)
Poids : 51 tonnes (mâle)
Longévité : 70 ans
Le mâle est jusqu'à 50% plus long et 3 fois plus lourd que la femelle.

En plongée profonde, le grand cachalot réalise son écholocalisation et communique avec ses partenaires par des « clics » ordonnés en séries décroissantes. Le premier d'une série est très puissant – jusqu'à 230 décibels –, puis l'intensité des suivants s'atténue. À 1000 mètres de profondeur, le cétacé ne peut produire ces ondes sonores en expulsant l'air de ses poumons. En effet, si, en surface, le volume des poumons d'un animal de 15 mètres est de 750 litres, à une telle profondeur, sous l'effet de la pression, il n'est plus que de 7,5 litres!

DEUX MIROIRS ET UN MATELAS

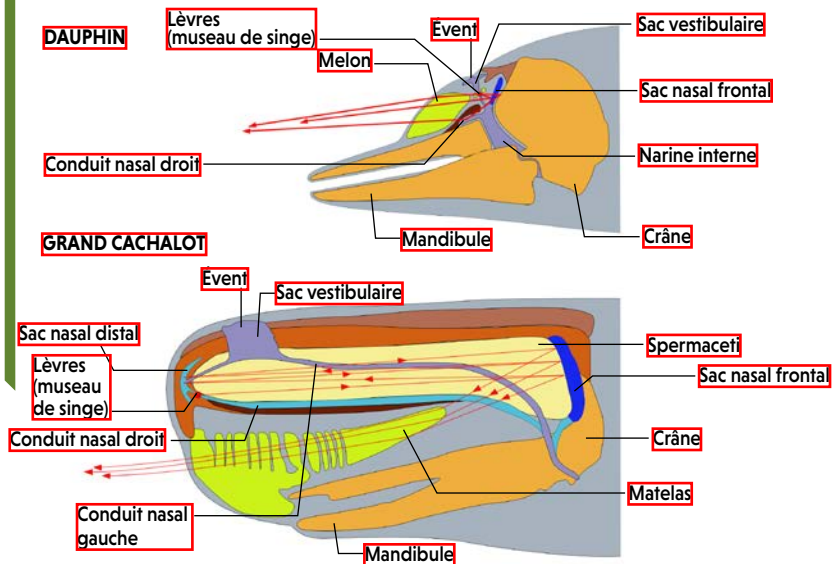
En fait, chez le grand cachalot, le site générateur des clics est à chercher du côté de son système nasal complexe et asymétrique dont l'anatomie fonctionnelle, étudiée dès 1885 grâce aux travaux pionniers de Georges Pouchet et Emmanuel Henri Beaugerard, s'est récemment trouvée détaillée par Stefan Huggenberger et ses collègues (voir l'encadré ci-contre). Le conduit nasal gauche sert à la respiration, mais le droit est original: il forme deux sacs nasaux, l'un derrière le spermaceti, comme chez le dauphin (sac frontal), l'autre devant, en avant du museau (sac distal).

Intuitivement, Pouchet et Beaugerard avaient compris la fonction capitale de ce sac distal. En décrivant l'anatomie fine du conduit nasal, ils découvrirent qu'à son arrivée sur ce sac, le conduit est doté de deux lèvres musculeuses en « museau de singe »: le site de génération des ondes sonores. Ce « museau » s'ouvre sous l'effet d'une surpression dans le conduit nasal. Les lèvres claquent et vibrent, produisant une série de sons dont la puissance et la répétition sont régulées par la pression de l'air et la tension des muscles. Les ondes rebondissent alors d'un sac nasal à l'autre, comme entre deux miroirs.

À chaque passage dans le spermaceti, une partie s'échappe à travers le matelas dont la graisse forme une succession de lentilles acoustiques, séparées par du tissu conjonctif et que des muscles peuvent déformer. Les ondes sont donc plus ou moins focalisées et guidées par le matelas jusqu'à l'avant de la tête, où elles sont émises dans l'eau. Elles forment un pinceau étroit lorsque l'animal fait de l'écholocalisation, plus large quand il s'agit de dialoguer. Et comme une partie des ondes s'échappe à chaque aller-retour dans le spermaceti, il y a une perte d'énergie. On comprend alors pourquoi le grand cachalot produit des séries de clics d'intensité décroissante.

UN SONAR ULTRAPERFECTIONNÉ

Pour se repérer, le dauphin ouvre son évent, gonfle ses poumons et ses sacs nasaux frontaux – l'analogue de nos sinus. Quand il expire, l'air fait vibrer des lèvres sous l'évent qui émettent alors des ondes sonores, lesquelles sont focalisées par le melon et émises dans l'eau. Rencontrant un obstacle, ces ondes reviennent en écho vers l'animal. Sa mâchoire inférieure joue le rôle d'antenne et les conduit jusqu'aux oreilles internes. Le dauphin localise l'obstacle grâce à l'intensité des ondes et à leur décalage par rapport à celles émises. Chez le grand cachalot, le conduit nasal gauche part du crâne et rejoint le sac vestibulaire qui débouche par l'évent: il sert à la respiration. Le droit, en revanche, forme deux sacs nasaux, l'un frontal, l'autre distal, avant de rejoindre le sac vestibulaire. Il est doté de lèvres qui vibrent sous l'effet d'une surpression, produisant des ondes sonores. Ces ondes se réverbèrent d'un sac nasal à l'autre. À chaque fois qu'elles atteignent le sac frontal, une partie s'échappe via le matelas dont la graisse forme une succession de lentilles acoustiques. Peu d'air suffit. Pas besoin, donc, de gonfler ses poumons...



Stefan Huggenberger et ses collègues montrent que la structure du dauphin est proche de l'état de l'ancêtre commun des odontocètes, tandis que celle du grand cachalot est dérivée. Analysons les processus qui ont fait passer d'un état dans un autre. Le site de déclenchement des ondes sonores, proche de l'évent, primitivement postérieur au melon, devient antérieur, nécessitant de longs canaux nasaux. Mais ainsi, chez le cachalot, ces ondes sont focalisées en suivant d'abord un mouvement rétrograde vers le crâne. Le « museau de singe » n'existe que sur un seul conduit nasal chez le cachalot, alors que son équivalent se trouve après la confluence des deux canaux nasaux chez le dauphin. Enfin, chez le cachalot, la dissociation anatomique et fonctionnelle entre les deux narines est totale, l'une servant à la respiration, l'autre à l'écholocalisation.

Ainsi, l'asymétrie, qui était d'abord liée à la déglutition de proies de grande taille chez les odontocètes, s'est trouvée ensuite utilisée dans la genèse d'un sonar ultraperfectionné adapté aux grandes profondeurs, offrant au grand cachalot une vie en maître dans un milieu obscur, mais sonore. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Huggenberger et al., **The nose of the sperm whale : Overviews of functional design, structural homologies and evolution**, *JMBA*, vol. 96(4), pp. 783-806, 2016.

C. D. MacLeod et al., **Breaking symmetry : The marine environment, prey size, and the evolution of asymmetry in cetacean skulls**, *Anat. Rec.*, vol. 290, pp. 539-545, 2007.

D. S. Houser et al., **Structural and functional imaging of bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) cranial anatomy**, *J. Exp. Biol.*, vol. 207, pp. 3657-3665, 2004.

DÉCOUVREZ LES ARCHIVES DE **POUR LA SCIENCE**



RETROUVEZ TOUS
LES NUMÉROS
DEPUIS 1996

COMPLÉTEZ VOTRE
COLLECTION SUR
www.pourlascience.fr/archives



L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international de
gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

COMBINATOIRE SUR PÂTES

De la compote à la sauce blanche, les systèmes pâteux sont très variés. Classer et dénombrer les différentes possibilités aide à inventer de nouvelles préparations.



Les préparations que la cuisine désigne par le terme «pâtes» sont souvent nommées suspensions par la physicochimie. Les plus simples sont des dispersions de particules solides, comme pour les pâtes sablées où des grains d'amidon sont dispersés dans la matière grasse du beurre; mais il y en a de plus compliquées, telles les compotes, où des groupes de quelques cellules végétales, partiellement dégradées par le cisaillement, sont dispersés dans une phase aqueuse. Quelle est l'étendue des possibilités?

Les systèmes dispersés les plus simples sont ceux où un gaz, un liquide ou un solide sont dispersés dans un gaz, un liquide ou un solide. Les «suspensions liquides», tels les roux, correspondent à la dispersion d'un solide dans un liquide, et les «suspensions solides» correspondent à la dispersion d'un solide dans un solide, comme les grains d'amidon dans une pâte sablée très froide.

Reste la question: quelles suspensions pouvons-nous cuisiner?

Si l'on considère une suspension de particules solides dispersées dans un liquide, il en existe quatre types principaux, car le liquide peut être une solution aqueuse ou une matière grasse fondue (de l'«huile») tandis que le solide peut être cristallin ou amorphe.

Si, par exemple, le solide est du sucre en poudre, on a affaire à des cristaux. Mais si nous faisons un sirop concentré que nous refroidissons brusquement en le coulant sur un plan de travail froid, il formera un «verre»; c'est ainsi que l'on fait croquantes et nougates. Dispersés dans une solution aqueuse, de tels solides se dissoudront, mais à des vitesses différentes, ce

Il existe une grande diversité de pâtes, qui diffèrent dans leur constitution, mais aussi dans leur consistance et leur façon de s'écouler.

dont le cuisinier tiendra compte, sachant par ailleurs que si la taille des solides est inférieure à 15 micromètres, on ne perçoit plus leur présence. Et si la phase dispersante est de l'huile, on obtient des systèmes inédits que je vous invite à goûter.

Il y a bien mieux si l'on envisage des solides plus complexes, tels les gels, que l'on peut disperser dans des liquides également plus complexes, telles les émulsions ou les mousses. Dans une chronique ancienne, j'avais ainsi proposé une généralisation, dénommée *gay-lussac*, des veloutés foisonnés, obtenue par exemple en mêlant une crème fouettée à une sauce blanche. J'avais aussi proposé des dispersions de microgels, sous le nom de «lechatelier».

Surtout, ce mois-ci, je veux évoquer des résultats sur les nombres de possibilités dans la constitution des gels (voir mon article dans les Notes académiques de l'Académie d'agriculture de France, vol. 1, pp. 1-12, 2017). Ainsi, le nombre de types simples de gels, de «classe 1», qui contiennent seulement une phase liquide (une solution aqueuse ou une huile) dispersée dans une phase solide, est de 16 si l'on tient compte de la dimensionnalité de la phase dispersée (dimension 0 si le liquide forme des points, dimension 1 s'il forme des canaux, dimension 2 pour des feuilletés, dimension 3 pour des blocs).

Mais le nombre de possibilités s'élève à près de 1500 si l'on passe aux gels de classe 2, où deux phases – gazeuse, liquide ou solide – sont dispersées dans la phase continue solide qu'est le réseau du gel.

Tous ces gels complexes peuvent se retrouver dans la phase continue liquide qui fait la suspension. Et l'on multiplie considérablement les possibilités en considérant que cette phase liquide peut être un liquide complexe, telle la mousse des *gay-lussac*.

Que diriez-vous d'une double dispersion formée de microcristaux imperceptibles parsemant la phase huile d'une émulsion foisonnée où l'on disperserait un gel foisonné et émulsionné? ■



LA RECETTE

- 1 Faire revenir des carapaces de crevettes dans de l'huile d'olive.
- 2 Au mixeur, broyer très finement du sucre, de l'acide citrique et les carapaces de crevettes brunies.
- 3 Dans une casserole, chauffer de la farine avec du beurre et faire un roux, que l'on ajoute à la dispersion précédente.
- 4 Cuire des oignons, des échalotes et des tomates dans du vin blanc. Mixer.
- 5 Quand cette préparation a un peu refroidi, lui ajouter de la crème fouettée.
- 6 Mélanger cela à l'huile et sa dispersion.



D'évolutions en révolutions



9 € 128 pages

Suivez-nous
sur les réseaux sociaux



quesaisje.com

A PICORER



Retrouvez tous
nos articles sur
www.pourlascience.fr

P.28

33 %

des conversions entre bitcoins et monnaies usuelles ont été piratées entre 2009 et 2015, selon un rapport de 2017 du département de la Sécurité intérieure des États-Unis.

P.56

KAZUMURA

C'est le nom donné à un tunnel de lave du volcan Kīlauea, à Hawaï. Ce conduit souterrain et naturel franchit 1102 mètres de dénivelé et s'étend sur 65 kilomètres avant de se déverser dans l'océan ! Au contact de l'eau de mer, la lave se solidifie et finit par former une plateforme instable, un delta de lave, qui s'écroulera quelques mois ou quelques années plus tard.

P.7

« *Le clonage humain ne sera pas le fait de chercheurs institutionnels, mais de quelque savant dévoyé au service d'une secte, voire d'un entrepreneur cherchant à proposer une nouvelle façon de se reproduire.* »

GEORGES CHAPOUTHIER, directeur de recherche émérite au CNRS

P.92

45°

Le souffle qu'un grand cachalot projette par son évent est incliné de 45° à gauche et atteint une hauteur de 15 mètres... soit à peu près sa taille.

P.74

PYRHÉLIOMÈTRES

Il y a un siècle, ces instruments servaient à mesurer la température à la surface du Soleil. En 1906, le physicien Charles Féry en conçut un prototype qu'il utilisa d'abord... pour mesurer la température des fourneaux d'usine. À l'époque, en effet, on évaluait celle-ci à l'aide d'un thermomètre. Placé au cœur du four, l'instrument ne durait jamais très longtemps...

P.24

DARWIN AWARDS

Ce prix est inspiré par un humour noir : il récompense chaque année, souvent à titre posthume, un individu qui, par un acte stupide ayant conduit à sa mort ou à sa stérilisation, dispense l'humanité de la transmission de son patrimoine génétique.

P.48

425 MILLIONS

C'est le nombre de personnes atteintes de diabète dans le monde en 2017, selon une estimation de la Fédération internationale du diabète. Parmi elles, 90 % souffrent d'un diabète de type 2, 10 % d'un diabète de type 1.



Grâce à l'engagement des bénévoles,

Sarah a vu son rêve se réaliser.

Pour que d'autres enfants et adolescents gravement malades puissent vivre une parenthèse enchantée dans leur combat contre la maladie, **l'Association Petits Princes a besoin de vous.**

DEVENEZ BÉNÉVOLE

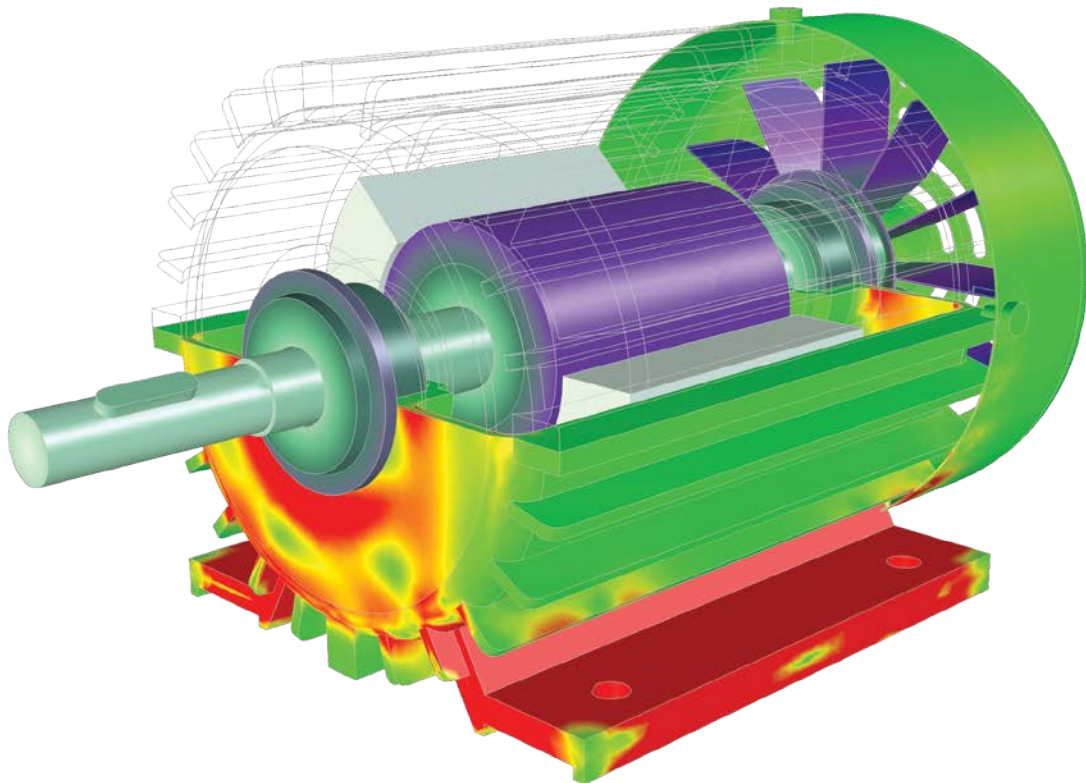
01 43 35 49 00

www.petitsprinces.com

**RÉALISEZ
LES RÊVES
DES ENFANTS
GRAVEMENT
MALADES.**

Chaque jour, un rêve d'enfant est réalisé.

Inventé au 19^{ième} siècle. Optimisé pour aujourd'hui.



Distribution des contraintes de von Mises dans le carter d'un moteur à induction avec prise en compte des effets électromécaniques.

Au 19^{ème} siècle, deux scientifiques ont inventé séparément le moteur à induction AC. Aujourd'hui, c'est un composant commun en robotique. Comment y sommes nous arrivé, et comment les ingénieurs d'aujourd'hui peuvent-ils continuer d'améliorer ces moteurs?

Le logiciel COMSOL Multiphysics® est utilisé pour simuler des produits, des systèmes et des procédés dans tous les domaines de l'ingénierie, de la fabrication et de la recherche. Découvrez comment l'appliquer pour vos designs.

comsol.blog/induction-motor